

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ
ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΑΡΑΔΗΜΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΜΑΡΙΝΑ ΜΩΡΕΤΤΗ, Επικ. Καθηγήτρια

ΒΟΛΟΣ 2011



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 10088/1
Ημερ. Εισ.: 07-11-2011
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2011
ΚΑΡ

Ευχαριστούμε την εταιρεία Sika για την προσφορά της σε υλικά CFRP, GFRP και εποξειδική κόλλα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

1.1 Εισαγωγή.....	9
1.2 Σύνθετα υλικά.....	16
1.3 Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών.....	25
1.4 Συμπεριφορά σκυροδέματος περισιγμένου μέσω FRPs.....	28
1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης των FRPs.....	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγή.....	35
2.2 Προσομοίωμα Fardis and Khalili (1982).....	36
2.3 Προσομοίωμα Karbhari and Gao (1997).....	37
2.4 Προσομοίωμα Samaan et al (1998).....	45
2.5 Προσομοίωμα Miyauchi et al. (1999).....	48
2.6 Προσομοίωμα Spoelstra and Monti (1999).....	49
2.7 Προσομοίωμα Toutanji (1999).....	53
2.8 Προσομοίωμα Saafi et al (1999).....	57
2.9 Προσομοίωμα Xiao and Wu (2000).....	58
2.10 Προσομοίωμα Lin and Chen (2001).....	60
2.11 Προσομοίωμα Wu Lu Wu (2006).....	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή.....	71
3.2 Πειράματα Lin and Chen (2001).....	73
3.3 Σύγκριση πειραμάτων Lin and Chen με προβλέψεις προσομοιωμάτων.....	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

4.1 Εισαγωγή.....	87
-------------------	----

4.2	Είδη δοκιμίων.....	88
4.3	Υλικά.....	88
4.4	Περιγραφή προετοιμασίας δοκιμίων.....	96
4.5	Προβλέψεις αντοχών και παραμορφώσεων θραύσης του πειραματικού προγράμματος.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		113
A.	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	114
B.	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	115
Γ.	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	118
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		121
ΠΙΝΑΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ		

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι καταστροφικοί σεισμοί ανά την υφήλιο δημιούργησαν την επιτακτική ανάγκη αναβάθμισης της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών που σχεδιαστήκαν στη βάση παλαιών ή και ανεπαρκών αντισεισμικών κωδικών/ή κανονισμών. Επίσης, οι αυξανόμενες λειτουργικές ανάγκες των υπαρχουσών κατασκευών καθιστούν αναγκαία την αναβάθμιση αυτών. Για τους λόγους αυτούς, το πεδίο των ενισχύσεων και των επισκευών κατασκευών έχει αρχίσει να απασχολεί σε σημαντικό βαθμό τον τεχνικό κόσμο της χώρας. Τα τελευταία 20 περίπου χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνική ενίσχυσης που βασίζεται στη χρήση προηγμένων υλικών, τα οποία αποτελούνται από ίνες εγκιβωτισμένες σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά, γνωστά ως ινοπλισμένα πολυμερή (FPP – Fiber Reinforced Polymers) χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες, που κάνουν την εφαρμογή τους στα τεχνικά έργα, και ιδιαίτερα στο πεδίο των επισκευών και των ενισχύσεων, ιδιαίτερα ελκυστική. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ή φέρουσας τοιχοποιίας συνίσταται στην επικόλλησή τους σε εξωτερικές δομικές επιφάνειες μελών μέσω εποξειδικών ρητινών, με προσανατολισμό ινών τέτοιον ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στη βελτίωση των χαρακτηριστικών περίσφιγξης κύλινδρων σκυροδέματος. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εφαρμογής των ινοπλισμένων πολυμερών, με αναφορά των υλικών, των τεχνικών, και των χαρακτηριστικών που διέπουν τη χρήση τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας αναφορικά με τα αναλυτικά μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία των ινοπλισμένων πολυμερών και την επιρροή τους στην περίσφιγξη του δομικού μέλους. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί, και τα οποία αναφέρονται σε μετρήσεις χαρακτηριστικών δοκιμών ενισχυμένων με στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών από δύο διαφορετικά υλικά. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές των αναλυτικών προσομοιωμάτων. Στο τέταρτο κεφάλαιο προτείνεται μια σειρά πειραμάτων με σκοπό την διερεύνηση της επιρροής στην περίσφιγξη της ταυτόχρονης εφαρμογής δύο διαφορετικών ινοπλισμένων υλικών σε έναν κύλινδρο. Υπολογίζονται τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά περίσφιγξης των συγκεκριμένων ενισχυμένων δοκιμών με βάση τα αναλυτικά προσομοιώματα, με στόχο να συγκριθούν με τις πειραματικές τους τιμές σε μελλοντική εκτέλεση των πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούν το σύστημα ενίσχυσης κατασκευών στο οποίο συνήθως αναφερόμαστε και με τον όρο «Σύνθετα υλικά». Ένα σύνθετο υλικό αποτελείται από δύο ή περισσότερο διακριτά μέρη, τα οποία τοποθετούνται μαζί για να συνθέσουν ένα σώμα. Στην παρούσα εργασία ο όρος «Σύνθετα υλικά» θα αναφέρεται στα ινοπλισμένα πολυμερή, τα οποία είναι ένα σύνθετο υλικό στο οποίο μια μήτρα πολυμερούς ενισχύεται με πλήθος λεπτών και μακριών ινών, ώστε να σχηματίζονται αντίστοιχα δύσκαμπτα ελάσματα ή εύκαμπτα υφάσματα μίας ή δύο διευθύνσεων. Τα υφάσματα αυτά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυση τους. Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι μια λύση ενίσχυσης κατασκευών που χαρακτηρίζονται, πέρα από τις αντοχές τους, από το μικρό τους βάρος, την ευκολία εφαρμογής, την ευκολία μεταφοράς, το σχετικά μικρό κόστος του συνδυασμού υλικών και εφαρμογής, τις ικανοποιητικές αντιστάσεις σε διαβρωτικές δράσεις, όπως και τις μικρές απαιτήσεις συντήρησης. Αυτά είναι τα κύρια χαρακτηριστικά τους που τα καθιέρωσαν ως μια από τις πιο ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών στον χώρο των κατασκευών και των ενισχύσεων.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια ανάγκη επισκευής, ενίσχυσης κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η ηλεκτρολυτική (γαλβανική) διάβρωση είναι η πιο βλαβερή διαδικασία που επηρεάζει την διάρκεια ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος, οι ζημιές από μηχανικούς παράγοντες είναι πιο συχνές, όπως για παράδειγμα ο σεισμός, η πυρκαϊά, οι εκρήξεις κ.λ.π. Επίσης οι λαθεμένοι υπολογισμοί ή οι κακοτεχνίες συχνά οδηγούν σε σοβαρές ζημιές ή ρηγματώσεις των στοιχείων του φορέα. Η αναστήλωση ή η αύξηση της φέρουσας ικανότητας μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα ήταν πάντα πολύ δύσκολη και οι επαρκείς λύσεις συχνά συνεπάγονται εκτεταμένες εργασίες.

Οι περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται ενίσχυση των δομικών στοιχείων είναι:

- Προσαρμογή παλαιών κατασκευών σε νέους κανονισμούς.
- Γήρανση των δομικών υλικών και διάβρωσης του οπλισμού.
- Κατασκευαστικά ελαττώματων (π.χ. ανεπαρκής αριθμός, κατανομή και τοποθέτηση των συνδετήρων).
- Αύξηση των φορτίων ή αλλαγής χρήσης του χώρου.
- Αποκατάσταση μετά από σεισμό.

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος ενίσχυσης δομικών στοιχείων είναι η τοποθέτηση μανδύα που περιβάλλει το υπάρχον δομικό στοιχείο. Ο εγκιβωτισμός του σκυροδέματος μέσω μανδύα επιφέρει:

- Αύξηση της παραμορφωσιμότητας (π.χ. σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων).
- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής.
- Μείωση της πιθανότητας τοπικού λυγισμού των οπλισμών.
- Βελτίωση της συνάφειας σε κρίσιμες περιοχές ενώσεων οπλισμών με μάτιση.

Υπάρχουν τρία είδη μανδύων, που κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό:

α) **Μεταλλικοί Μανδύες:** Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε αρχικά για κυκλικά υποστυλώματα. Δύο κελύφη σε σχήμα ημικυκλίου τοποθετούνται στο υποστυλόμετρο και συγκολλούνται μεταξύ τους σε όλο το ύψος. Η ακτίνα τους είναι 1.25-2.5cm μεγαλύτερη από την ακτίνα του υποστυλώματος. Το κενό μεταξύ του υποστυλώματος και του μεταλλικού μανδύα πληρώνεται με ένεμα τσιμέντου. Η περίσφιξη που προσφέρει ο μεταλλικός μανδύας είναι συνάρτηση της αντοχής και της δυσκαμψίας του. Σε ορθογωνικά υποστυλώματα προτείνεται η χρήση μανδύων ελλειπτικού σχήματος προσφέροντας έτσι ομοιόμορφη περίσφιξη. Το κενό μεταξύ υποστυλώματος και μανδύα πληρώνεται με έγχυτο σκυρόδεμα. Η χρήση μανδύα ορθογωνικού σχήματος αποφεύγεται.

β) **Μανδύες από σκυρόδεμα:** Η προσθήκη ενός μανδύα από σκυρόδεμα αρκετού πάχους προσδίδει επιπλέον αντοχή σε κάμψη, σε διάτμηση όπως επίσης και σε

περίσφιξη. Η τεχνική αυτή αν και είναι περισσότερο συνηθισμένη για ενισχύσεις υποστυλωμάτων κτιρίων εφαρμόζεται και σε άλλου είδους υποστυλώματα. Ο διαμήκης οπλισμός του μανδύα πρέπει να αγκυρώνεται μέσα στο θεμέλιο του υποστυλώματος ή στην παρούσα πλάκα. Προτιμούνται μανδύες με κυκλικό ή ελλειπτικό σχήμα οι οποίοι προσδίδουν ομοιόμορφη περίσφιξη στο υποστυλώμα. Στην περίπτωση του ορθογωνικού μανδύα απαιτούνται πρόσθετες κατασκευαστικές διατάξεις, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη περίσφιξη, όπως η τοποθέτηση σιγμοειδούς οπλισμού στο μέσο των παρειών ο οποίος διέρχεται μέσα από οπές που ανοίγονται στο υπάρχον υποστυλώνα.

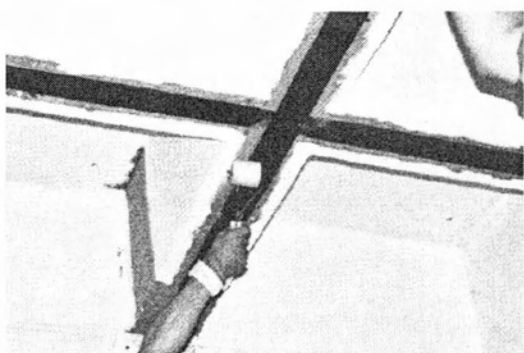
γ) **Μανδύες από σύνθετα υλικά:** Έχει εκτελεστεί μεγάλη σειρά πειραμάτων με τα οποία έχει αποδειχθεί η αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων τα οποία είναι περισφιγμένα με μανδύες σύνθετων υλικών με ίνες υάλου, άνθρακα ή κέβλαρ. Επίσης έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι τα σύνθετα υλικά είναι πιο αποδοτικά όσον αφορά στην περίσφιξη από ότι ο μεταλλικός μανδύας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο χάλυβας του μανδύα εισέρχεται από τις πρώτες ανακυκλήσεις στη διαρροή, έτσι στις επόμενες ανακυκλήσεις, λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων του χάλυβα, απαιτείται συνεχώς μεγαλύτερη παραμόρφωση για να αναπτυχθεί η απαιτούμενη τάση περίσφιξης από το μεταλλικό μανδύα προς το σκυρόδεμα του υποστυλώματος. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με τους μανδύες σύνθετων υλικών μιας και τα υλικά αυτά λόγω γραμμικής σχέσης τάσης-παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία τους συμπεριφέρονται ελαστικά και η τάση περίσφιξης είναι σταθερή σε όλες τις ανακυκλήσεις. Η βελτίωση των ιδιοτήτων των μελών σκυροδέματος μέσω της ενίσχυσής τους με μανδύες σύνθετων υλικών συνίσταται συγκεκριμένα στα εξής:

1. Ενίσχυση σε διάτμηση, μέσω της επικόλλησης υφασμάτων τα οποία τοποθετούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κυρίων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα σε πιθανές ρωγμές. Αυτό δεν είναι γενικά εφικτό, γι' αυτό και στις περισσότερες περιπτώσεις τα υφάσματα τοποθετούνται έτσι ώστε οι ίνες να βρίσκονται κάθετα στον άξονα του μέλους [1]. Φωτογραφίες τέτοιων εφαρμογών δίνονται στην Εικόνα 1.1.1.

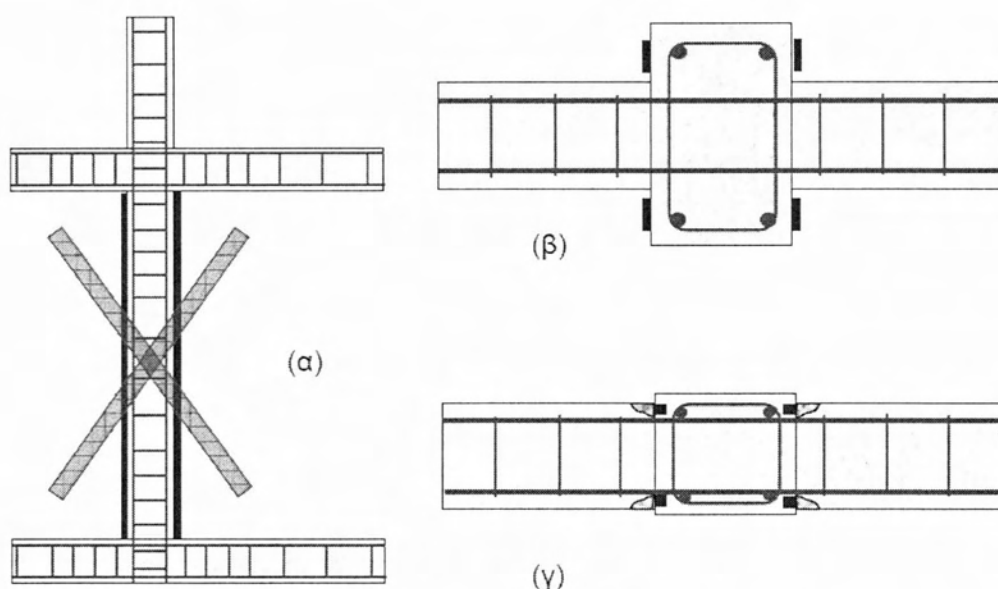


Εικόνα 1.1.1: Ενίσχυση σε διάτμηση (α) κρίσιμης περιοχής δοκού (β) υποστυλώματος.
[1]

2. Ενίσχυση σε κάμψη, η οποία στην περίπτωση στοιχείων τύπου πλάκας ή δοκού γίνεται μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων ή ακόμα και ράβδων σε εγκοπές, τα οποία επικολλούνται στο άνοιγμα των στοιχείων στο εφελκόμενο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις. Φωτογραφίες τέτοιων εφαρμογών δίνονται στην Εικόνα 1.1.2. Στην περίπτωση των υποστυλωμάτων, τα οποία έχουν κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές, η εφαρμογή των σύνθετων υλικών μέσω υφασμάτων ή ελασμάτων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. Τούτο γίνεται εφικτό όταν οι δοκοί έχουν μικρότερο πλάτος από τα υποστυλώματα ή όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί σύνθετων υλικών μικρού πλάτους (πχ μορφής ράβδων) σε εγκοπές, όπως δείχνει το Σχήμα 1.1.2. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, η ενίσχυση των υποστυλωμάτων έναντι κάμψης γίνεται εμμέσως, μέσω της αύξησης της ικανότητας παραμόρφωσης και θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, που είναι και η τρίτη συνεισφορά των συνθετών υλικών ως οπλισμός ενίσχυσης που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο καθώς και εκτενέστερα στη συνέχεια του κειμένου.



Εικόνα 1.1.2: Ενίσχυση σε κάμψη δοκών μέσω εφαρμογής ελασμάτων [1].



Σχήμα 1.1.2: Ενδεικτικές διατάξεις καμπτικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων για μέγιστη ροπή στα άκρα. (α) Εσφαλμένη εφαρμογή (β) συνέχεια οπλισμού τύπου ελάσματος μέσω της πλάκας (γ) συνέχεια οπλισμού τύπου ράβδου σε εγκοπές μέσω του κόμβου [1].

3. Βελτίωση των χαρακτηριστικών περίσφιξης του σκυροδέματος η οποία κρίνεται εξαιρετικά ευνοϊκή. Επιτυγχάνεται μέσω περιέλιξης των υφασμάτων γύρω από τις ακραίες διατομές του υποστυλώματος, με τις ίνες είτε σε οριζόντια διάταξη είτε υπό γωνία ως προς τον άξονα του μέλους. Φωτογραφίες τέτοιων εφαρμογών δίνονται στην Εικόνα 1.1.3. Η δράση περίσφιξης επιτυγχάνεται στην περίπτωση της αξονικής θλίψης του σκυροδέματος του υποστυλώματος, οπότε μέσω της εγκάρσιας διόγκωσής του, ενεργοποιούνται οι ίνες του μανδύα μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων, επιβάλλοντας εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις περίσφιξης κάθετα στον άξονα του μέλους. Η ευεργετική

αυτή επίδραση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και τη γενικότερης ικανότητας παραμόρφωσης του μέλους.



Εικόνα 1.1.3: Περίσφιγξη υποστυλωμάτων με μανδύες σύνθετων υλικών [1].

Ειδικότερα όσον αφορά στους μανδύες από CFRP και GFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers, Glass Fiber Reinforced Polymers) από πειραματικά αποτελέσματα σε περίσφιγξη προέκυψε ότι η τεχνολογία των περισφίξεων μελών μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα με την χρήση φύλλων CFRP - GFRP είναι εύκολη στην κατασκευή και στην μελέτη και έχει σαν αποτέλεσμα το ολικό φορτίο που μπορεί να μεταφέρει το ενισχυμένο μέλος στην κατασκευής να είναι μεγαλύτερο και σε μικρότερο ποσοστό να καλυτερεύει την ελαστικότητά του. Συγχρόνως πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα η προετοιμασία της συγκεκριμένης περιοχής του σκυροδέματος η οποία θα ενισχυθεί. Πρέπει να αποφευχθεί όσο είναι δυνατό η αποδιοργάνωση των ινών του υλικού στην περιοχή, η οποία ενισχύεται έτσι ώστε να μπορέσει το υλικό να τηρήσει τις προδιαγραφές για τις οποίες έχει κατασκευασθεί. Επίσης, βασικότερη προϋπόθεση επιτυχούς εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι η εξασφάλιση του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης, το οποίο πετυχαίνεται εύκολα στην περίσφιγξη, μέσω αλληλοεπικάλυψης των υφασμάτων.

Τα FRPs θεωρούνται ως από τα πιο πολλά υποσχόμενα υλικά κατασκευών – ενισχύσεων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα τις τελευταίες 3 δεκαετίες. Οι κυρίες εφαρμογές των FRP είναι στην κατασκευή, στις ενισχύσεις και επισκευές και στις αποκαταστάσεις. Κύριοι λόγοι χρήσης των FRP είναι η φέρουσα υποβάθμιση του δομικού στοιχείου λόγω περιβαλλοντικών επιδράσεων και φυσικών φαινομένων, η αύξηση των εφαρμοζόμενων φορτίσεων, η ανάγκη υποστήριξης σε φάσεις επισκευών, η ανάγκη να επεκταθεί η ωφέλιμη διάρκεια ζωής της κατασκευής με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση δαπανών. Τα δομικά στοιχεία μίας κατασκευής είναι

πιθανό υπό κάποιες συνθήκες να παρουσιάσουν ανεπάρκεια αντοχής ή/και πλαστιμότητας (δυνατότητα να δεχτούν αυξημένες παραμορφώσεις σε περιπτώσεις σεισμών και άλλων έκτακτων φορτίων), με αποτέλεσμα να γίνεται επιτακτική η ανάγκη ενίσχυσής τους.

Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των σύνθετων υλικών εξαρτώνται κάθε φορά από πολλούς παράγοντες όπως:

- η γεωμετρία και οι διαστάσεις των προς ενίσχυση στοιχείων
- το είδος της εντατικής τους καταπόνησης
- οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. σε θερμοκρασίες κάτω των 10°C η σκλήρυνση των ρητινών είναι δύσκολη)
- η εμπειρία του μηχανικού και του διατιθέμενου εργατοτεχνικού προσωπικού
- ο προϋπολογισμός της επέμβασης.

Βεβαίως, εκτός από την προσεκτική επιλογή των σύνθετων υλικών και την επιμελημένη εφαρμογή τους, ένας από τους παράγοντες που καθορίζει εάν η επέμβαση θα είναι επιτυχής είναι και η αντοχή και η ποιότητα του υποστρώματος στο οποίο θα γίνει η επικόλληση. Πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή ή επιφάνεια τραχειά, γεμάτη με σκόνη, λάδια κ.λ.π δεν θα εξασφαλίσουν καλή ποιότητα δεσμού μεταξύ υποστρώματος και σύνθετων υλικών με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία του ινοπλισμένου πολυμερούς.

Ακολούθως, επιχειρείται μια συνοπτική περιγραφή των βασικών συστατικών των σύνθετων υλικών, που είναι οι ίνες, η πολυμερική μήτρα και η κόλλα εφαρμογής τους.

1.2 Σύνθετα υλικά

1.2.1 Ίνες

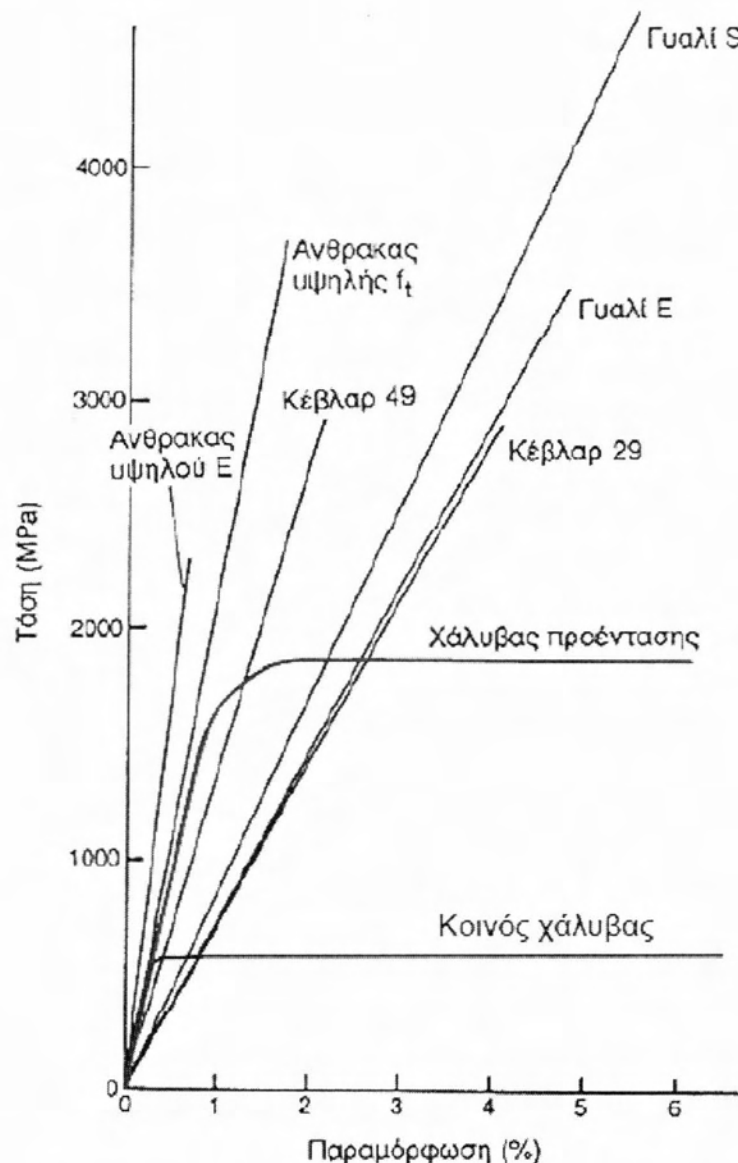
Οι ίνες στα σύνθετα υλικά, διαμέτρου 5 – 25 μm , αποτελούν τον φορέα ανάληψης δυνάμεων (κατά κανόνα εφελκυστικών) παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους, που φαίνεται και στο Σχήμα 1.2.1.

Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), οι ίνες γυαλιού (υαλονήματα) και οι ίνες αραμιδίου, με βασικές ιδιότητες που δίνονται στον Πίνακα 1.2.1. Επισημαίνεται ότι οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στις ίνες υπό μονοτονική φόρτιση, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση της μακροχρόνιας φόρτισης και τυχόν δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Οι **ίνες γυαλιού** (GFRP) παρασκευάζονται από λειωμένο γυαλί πυκνότητας 2300 – 2500 kg/m^3 και κατηγοριοποιούνται σε αυτές των τύπων E, A, Z, C, E-CR, R, S, ARS με τις E να έχουν εξαιρετικές ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες και αυτές των S να έχουν καλύτερες αντοχές σε εφελκυσμό και αντίσταση σε διάβρωση και πυρκαγιά. Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ο τύπος E (E-glass, E = electrical) είναι ο κοινός και πλέον συνηθισμένος τύπος γυαλιού με βασικό μειονέκτημα τη μείωση της αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως είναι αυτό του σκυροδέματος. Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια. Ο τύπος C-glass (C=corrosion) περιλαμβάνει υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες. Ο τύπος Z έχει μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον. Ο τύπος S-glass (S=stiffness) είναι ακριβότερο υλικό από το E-glass,

αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία. Ως μειονέκτημα της επιφάνειας των ινών μπορεί να θεωρηθεί το ευπρόσβλητο στην υγρασία σε ορισμένες συνθήκες έκθεσης και πάνω από κάποια επίπεδα φόρτισης. Είναι όμως υλικό εύκολο στην παραγωγή. Το μέτρο ελαστικότητας των GFRP είναι κοντά στο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος που τα καθιστά πολύ πιο συμβατά με το σκυρόδεμα (25-37 MPa) συγκριτικά με άλλα υλικά ενίσχυσης, ενώ δοκιμές των GFRP υπό συνθήκες κόπωσης απέδειξαν πως συμπεριφέρονται 20 φορές καλύτερα από το συμβατικό χάλυβα υπό τις ίδιες συνθήκες.

Οι **ίνες άνθρακα** (CFRP), με πυκνότητα $1800 - 1900 \text{ kg/m}^3$, είναι το κύριο υλικό ινών για επίτευξη υψηλών αντοχών. Ο όρος ίνες άνθρακα καλύπτει μια ολόκληρη οικογένεια υλικών που παρουσιάζουν μεγάλο εύρος αντοχών και ακαμψιών. Τυπικές τιμές μέτρου ελαστικότητας κυμαίνονται μεταξύ 230 - 300 GPa και οι αντοχές τους από 3000 - 5000 MPa. Παρασκευάζονται είτε από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (PAN) είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου (Pitch). Οι πρώτες χαρακτηρίζονται γενικά από μεγαλύτερες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας, και συνεπώς θεωρούνται καλύτερης ποιότητας. Οι ίνες άνθρακα είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.



Σχήμα 1.2.1: Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα [1].

Οι **ίνες αραμιδίου** είναι πολύ ανθεκτικές οργανικής χημικής σύστασης (ενώσεις αρωματικών πολυαμιδίων) συνθετικές ίνες με μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται μεταξύ 60 – 150 GPa και αντοχές ως 3000 MPa και χαμηλή πυκνότητα (1400 kg/m^3). Γίνεται διάκριση μεταξύ των παρα-αραμιδικών (Kevlar) και μετα-αραμιδικών ινών, με τις πρώτες να παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες και σε φωτιά (θερμοκρασία αποσύνθεσης 450°C) και εφαρμόζονται γενικότερα σε εφαρμογές υψηλών επιδόσεων. Επίσης, διακρίνονται σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ, Twaron) και σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora).

Συγκριτικά με τις ίνες άνθρακα παρουσιάζουν φαινόμενα λυγισμού και υψηλή απορρόφηση υγρασίας. Κύριο πλεονέκτημά τους είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία.

Πίνακας 1.2.1: Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ινών [1].

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
Άνθρακας			
Υψηλής αντοχής	215 - 235	3500 – 4800	1.4 – 2.0
Υπερ – υψηλής αντοχής	215 - 235	3500 – 6000	1.5 – 2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350 – 500	2500 – 3100	0.5 – 0.9
Υπερ - υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500 – 700	2100 – 2400	0.2 – 0.4
Γυαλί			
E	70 – 75	1900 – 3000	3.0 – 4.5
Z	70 – 75	1900 – 3000	3.0 – 4.5
S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5
Αραμίδιο			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)	70 – 80	3500 – 4100	4.3 – 5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron)	115 – 130	3500 - 4000	2.5 – 3.5

Οι **μεταλλικές ίνες** παρασκευάζονται από διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο

υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

Οι **κεραμικές ίνες** χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θεοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al₂O₃), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si₃N₄, BeO, B₄C και ZrO₂. Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια.

Οι **τριχίτες** είναι νηματικοί μονοκρυστάλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1 μm, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη.

Οι **ίνες φυσικών ορυκτών** παρασκευάζονται όταν αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμεντα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica). Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~20 nm, και έχουν διάμετρο ~10 μm και μήκος αρκετά cm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία 500°C, οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa. Ο αμιάντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα. Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της

αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700 - 900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm^3 .

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια ποιοτική σύγκριση των τριών επικρατέστερων τύπων ινών, που παρέχει κριτήρια επιλογή για τη χρήσης τους στις κατασκευές.

Πίνακας 1.2.2: Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα, αραμιδίου, γυαλιού [2].

Κριτήρια	Ίνες άνθρακα	Ίνες αραμιδίου	Ίνες γυαλιού
Εφελκυστική αντοχή	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Θλιπτική αντοχή	Πολύ καλή	Μη ικανοποιητική	Καλή
Μέτρο ελαστικότητας	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική
Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες δράσεις	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική
Συμπεριφορά κόπωσης	Εξαιρετική	Καλή	Ικανοποιητική
Πυκνότητα	Καλή	Εξαιρετική	Ικανοποιητική
Ανθεκτικότητα σε αλκάλια	Πολύ καλή	Καλή	Μη ικανοποιητική
Τιμή	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική	Πολύ καλή

1.2.2 Μήτρα

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Αναλυτικότερα, ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους.
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές.
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες.
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Η μήτρα καθορίζει αρκετές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως είναι η αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, η διατμητική αντοχή και η θλιπτική αντοχή.

Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν «συμβατότητα» με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές.
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου υλικού. Οι οργανικές μήτρες χρησιμοποιούνται για θερμοκρασίες έως 250°C, που είναι οι συνήθεις παρατηρούμενες στις κατασκευές. Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

(α) **Θερμοπλαστικές:** Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές

ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμιάντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

(β) **Θερμοσκληρυνόμενες:** Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

- Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξειδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200°C, καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική. Οι εποξειδικές ρητίνες υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις. Είναι όμως ακριβότερες των υπολοίπων.
- Βινυλεστερικές ρητίνες.
- Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C.

Πίνακας 1.2.3:Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ρητινών χρησιμοποιούμενων ως μήτρα
[3]

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή MPa	Μέτρο ελαστικότητας GPa	Επιμήκυνση Θράυσης (%)	Πυκνότητα g/cm ³
Εποξειδική	55 - 130	2.0 - 4.5	4.0 - 14.0	1.2 - 1.3
Πολυεστερική	35 - 104	2.1 - 4.1	< 5.0	1.1 - 1.46
Βινυλεστερική	73 - 81	3.0 - 3.6	3.5 - 5.5	1.12 - 1.32

1.2.3 Κόλλα

Κατά κανόνα χρησιμοποιείται ως κόλλα εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών που εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξειδικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών: χρόνος εργασιμότητας (pot life), χρόνος εφαρμογής (open time), θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g (glass transition temperature).

Ο χρόνος εργασιμότητας είναι αυτός που έχει κανείς στη διάθεσή του για να χρησιμοποιήσει την κόλλα με ευκολία πριν αρχίσει να αυξάνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται στο δοχείο όπου έγινε η ανάμιξη. Εξαρτάται από τον τύπο της κόλλας, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και από την ποσότητα της κόλλας που προκύπτει με την ανάμιξη των δύο συστατικών. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα τυπικής κόλλας 5 kg είναι 90 min σε 15 ° C και 30 min σε 35 ° C.

Ο χρόνος εφαρμογής αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το διάστημα θα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του υποστρώματος.

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών και είναι η θερμοκρασία εκείνη στην οποία η κόλλα υφίσταται ραγδαία απομείωση του μέτρου ελαστικότητας, οπότε έχει περιορισμένη πλέον ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων εποξειδικών ρητινών και σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες για σκυρόδεμα και χάλυβα.

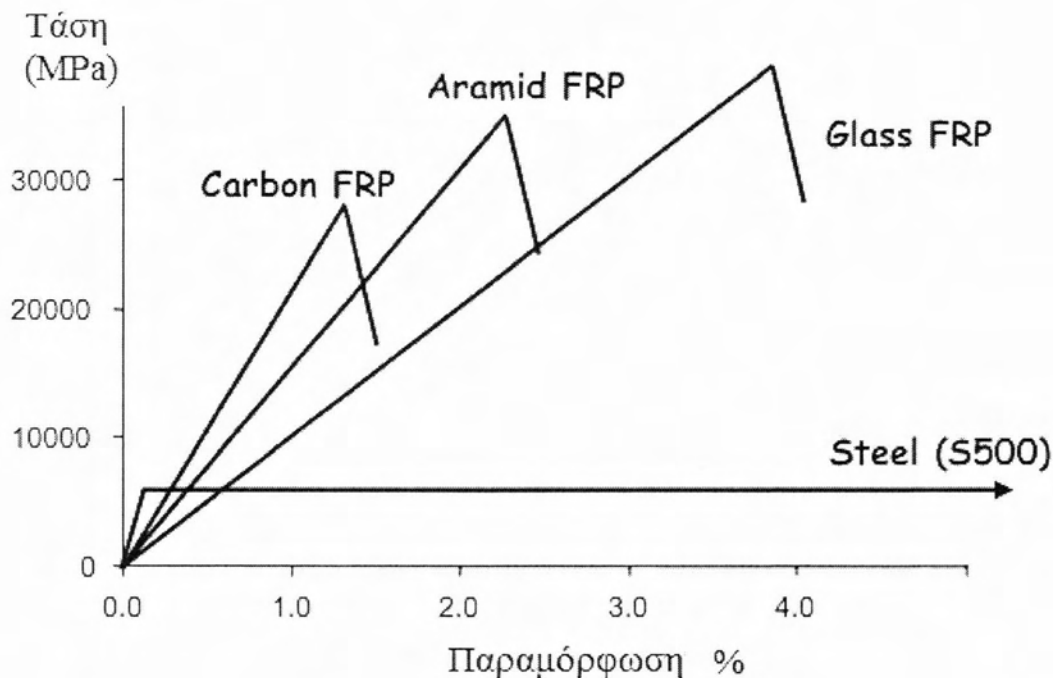
Πίνακας 1.2.4: Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ρητινών χρησιμοποιούμενων ως κόλλα [4]

Ιδιότητα (σε 20°C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα (kg/m ³)	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας (KN/mm ²)	0.5-20	20-50	205
Μέτρο διάτμησης (KN/mm ²)	0.2-8.0	8-21	80
Λόγος Poisson	0.3-0.4	0.2	0.3

Εφελκυστική αντοχή (N/mm ²)	9-30	1-4	200-600
Διατμητική αντοχή (N/mm ²)	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική αντοχή (N/mm ²)	55-110	25-150	200-600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό(%)	0.5-5 0	0.015	20-25
Ενέργεια θραύσης (Jm ⁻²)-κατά προσέγγιση	200-1000	100	10 ⁵ -10 ⁶
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 ⁻⁶ /°C)	25-100	11-13	10-15
Υδατοαπορροφητικότητα: 7ημ. - 25°C (% κ.β.)	0.1-3	5	0
Θερμοκρασία ναλώδους μετάπτωσης (°C)	50-80	-	-

1.3 Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά είναι γενικά φύσει ανισοτροπικά (εξαρτώμενα της κατεύθυνσης της φόρτισης) και τυπικά ορθοσκοπικά. Η μηχανική των παραμορφώσιμων υλικών περιγράφει τα ισοτροπικά υλικά με το μέτρο της ελαστικότητας, το μέτρο της διάτμησης και το λόγο Poisson με σχετικά απλές εξισώσεις. Για την περιγραφή των ανισοτροπικών υλικών απαιτούνται μαθηματικές σχέσεις τανυστών δεύτερης τάξης και ως 21 σταθερές υλικών. Στα FRP η διαρροή εμφανίζεται μόνο κατά την διεύθυνση των ινών. Ακριβώς αυτή η ανισοτροπική συμπεριφορά επηρεάζει την διατμητική αντοχή των FRP όπως και την συνολική τους επίδοση ως υλικού ενίσχυσης κατασκευών. Χαρακτηριστική είναι η απότομη και καταστροφική διάρρηξη του στην αστοχία, που φαίνεται και από τα διαγράμματα του επόμενου σχήματος. Σε αυτά καταδεικνύεται η μηχανική συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών, η οποία συνίσταται σε πλήρη γραμμική συμπεριφορά χωρίς διαρροή.

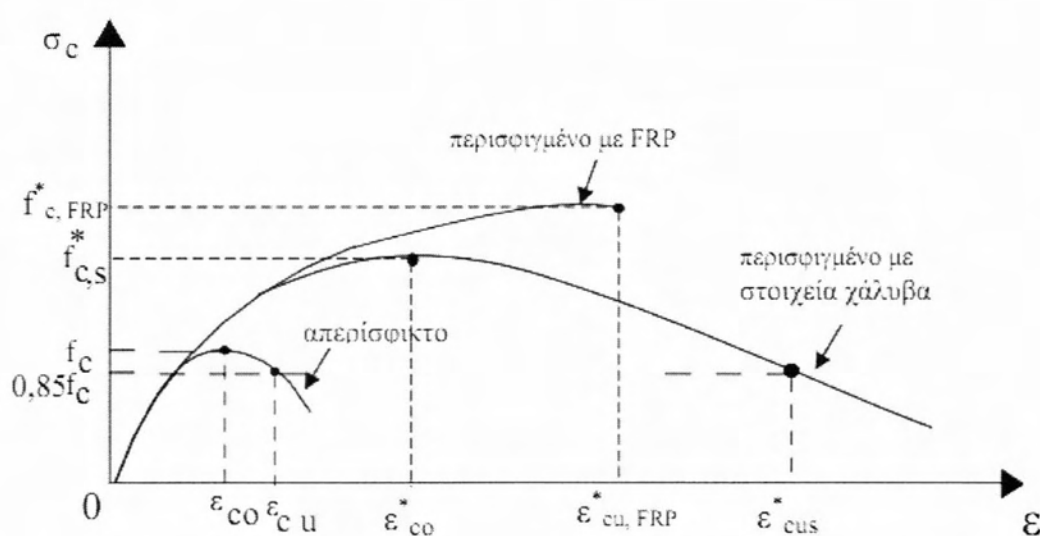


Σχήμα 1.3.1: Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης σε εφελκυσμό για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με χάλυβα [5].

Μια από τις πλέον ελκυστικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι η ευεργετική επιρροή τους στην περίσφιγξη των δομικών στοιχείων. Η δράση των συνθέτων υλικών κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ευνοϊκή και γενικά ευνοϊκότερη σε σχέση με αυτήν μεταλλικών μανδυνών ίσης δυσκαμψίας. Κατά την αξονική καταπόνηση υποστυλωμάτων λόγω κάμψης και/ή αξονικού φορτίου, το σκυρόδεμα υφίσταται σημαντική διόγκωση ώστε ο φαινόμενος συντελεστής του Poisson να φτάνει και να ξεπερνάει την οριακή τιμή 0.5. Ο μανδύας, όπως και οι συνδετήρες, δρα παθητικά ως κινηματικός περιορισμός της διόγκωσης, αναπτύσσοντας εφελκυσμό λόγω τάνυσης μέχρις ότου αστοχήσει. Σε κυκλικές διατομές η δράση αυτή είναι ιδανικά ομοιόμορφη στο σύνολο της διατομής και μπορεί να εξιδανικευτεί ως υδραυλική πίεση, οπότε ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης είναι ίσος με 1. Σε ορθογωνικές διατομές όμως, ο κινηματικός περιορισμός εξασθενεί επειδή η διόγκωση μπορεί να λάβει χώρα με κάμψη του συνδετήρα ή του μανδύα προς τα έξω στο μέσο των πλευρών. Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης κυμαίνεται από 0.5 έως 0.6 για τετράγωνη διατομή και είναι περίπου 0 για επιμήκη ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών περίπου 3. Οι τάσεις περίσφιγξης έχουν ως αποτέλεσμα:

- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος.
- Αύξηση της γωνίας στροφής χορδής ενός μέλους στην (καμπτική) αστοχία, δηλαδή αύξηση της πλαστιμότητας.
- Βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
- Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων

Στο παρακάτω σχήμα δίνονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για δομικό μέλος οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένου με μανδύα FRP και με μεταλλικό μανδύα, και γίνεται η σύγκριση μεταξύ τους, καθώς και με την περίπτωση μη περισφιγής. Παρατηρείται πως στην περίπτωση του μανδύα FRP επιτυγχάνεται υψηλότερη αντοχή αλλά μικρότερη πλαστιμότητα, καθώς δεν υπάρχει ικανότητα ανάληψης δυνάμεων και παραμορφώσεων μετά την θραύση. Το γεγονός αυτό αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα των ινοπλισμένων πολυμερών, το οποίο επιβάλλει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με παραδοσιακά συστήματα χάλυβα οπλισμού.



Σχήμα 1.3.2: Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με χαλύβδινα στοιχεία και με ινοπλισμένα πολυμερή [5].

1.4 Συμπεριφορά σκυροδέματος περισφιγμένου μέσω FRPs

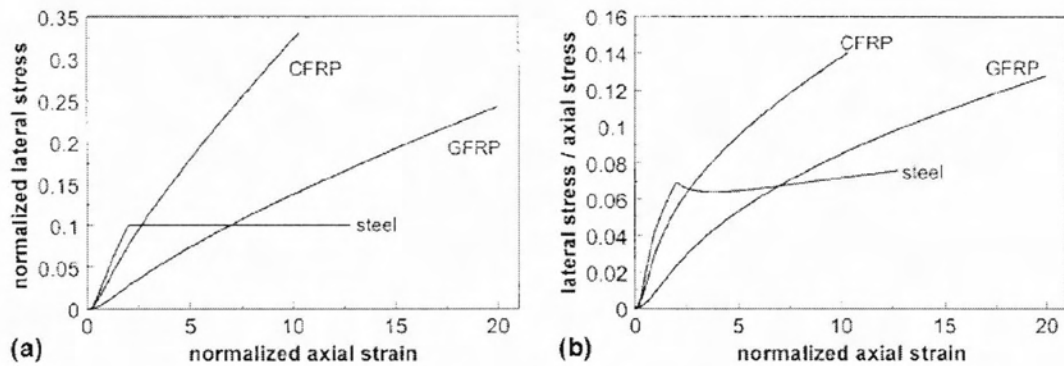
Οι μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούν τον πλέον εύχρηστο τρόπο επιβολής της περίσφιγξης σε υποστυλώματα και βάθρα γεφυρών. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο η εφαρμογή αυτής της τεχνικής εξαπλώνεται ραγδαία, σε συνδυασμό με την εντυπωσιακή βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, η οποία έχει τεκμηριωθεί από πλήθος πειραματικών δοκιμών στην διεθνή βιβλιογραφία.

Η μελέτη γύρω από τη περίσφιγξη που προφέρουν τα FRP συνίσταται στην εκτέλεση πειραμάτων σε δοκίμια κυλινδρικού σχήματος καθώς και πρισματικού. Οι μεταβλητές που εξετάζονται για να προσδιορισθεί η επίδραση της καθεμίας στην προσφερόμενη περίσφιγξη είναι:

- ο τύπος των ινών (CFRP ή GFRP)
- ο αριθμός των στρώσεων του ινοπλισμένου υφάσματος
- η κλίση των ινών ως προς τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου
- η χρήση ολόσωμης στρώσης ή λωρίδων
- η γεωμετρία της κατασκευής (σε περίπτωση ορθογωνικών διατομών)
- η ακτίνα καμπύλωσης των ακμών (σε περίπτωση ορθογωνικών διατομών)
- η ποιότητα και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- το είδος της φόρτισης (μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη)

Στο Σχήμα 1.4.1(α), συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης (διαγράμματα πλευρικής τάσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης) για τους τρεις τύπους μανδύων: μεταλλικούς, ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού και ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα. Πριν τη διαρροή, ο μανδύας χάλυβα ασκεί μια υψηλότερη δράση περίσφιγξης, η οποία, εντούτοις, παραμένει σταθερή μετά από τη διαρροή, ενώ οι μανδύες FRPs παρουσιάζουν μια μονοτονικά αυξανόμενη περίσφιγξη που συνίσταται σε δράση περίσφιγξης δύο φορές (GFRP) ή τρεις φορές (CFRP) μεγαλύτερη αυτής του χάλυβα, για το ίδιο ογκομετρικό ποσοστό. Στο Σχήμα 1.4.1 (β), είναι ενδιαφέρον να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα των μανδύων που εκφράζεται μέσω του λόγου της πλευρικής τάσης προς την εκάστοτε αντίστοιχη αξονική τάση. Σημειώνεται ότι η αύξηση της αποτελεσματικότητας του μανδύων χάλυβα μετά τη διαρροή οφείλεται μόνο στην φθίνουσα συμπεριφορά του

σκυροδέματος, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις η ελαστική συμπεριφορά των μανδυνών FRP αυξάνει αυτόν τον λόγο. Εδώ πρέπει να είναι εμφανές πώς τα δύο υλικά FRP φθάνουν σχεδόν στο ίδιο επίπεδο αποτελεσματικότητας, αλλά σε διαφορετικά επίπεδα αξονικής παραμόρφωσης, γεγονός το οποίο καθιστά περισσότερο ελκυστική τη χρήση των μανδυνών GFRP που εκμεταλλεύονται επίσης την ολκιμότητα, διατηρώντας παράλληλα την ίδια αποτελεσματικότητα σε αύξηση της αντοχής με τους μανδύες CFRP.

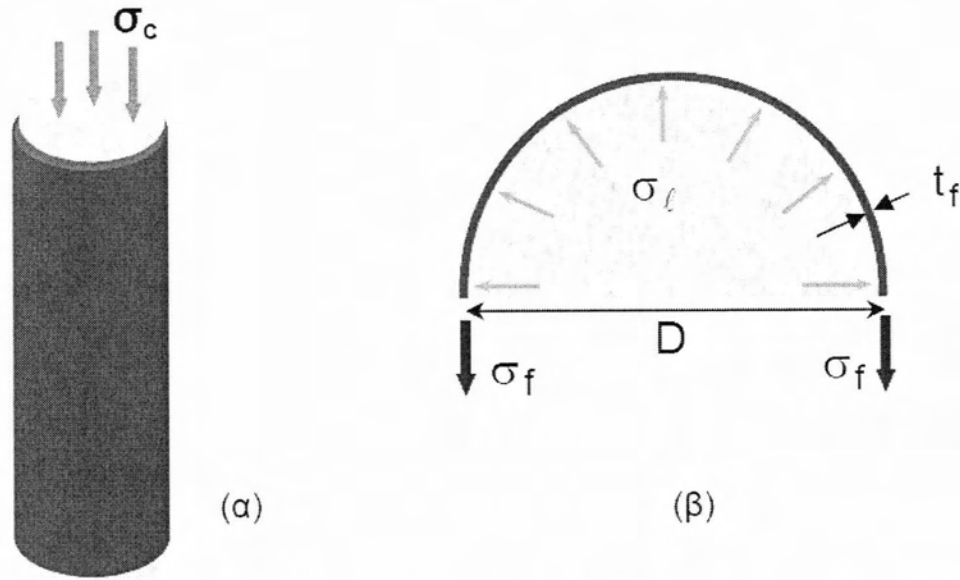


Σχήμα 1.4.1: Σύγκριση της αποτελεσματικότητας περίσφιγξης για τρεις τύπους μανδυνών [6].

Προκειμένου να αναλυθεί η συμπεριφορά και να εξαχθεί ο καταστατικός νόμος του περισφιγμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά θεωρούμε ένα κυλινδρικό στοιχείο από σκυρόδεμα διαμέτρου D , το οποίο περιβάλλεται από μανδύα συνθέτων υλικών πάχους t_f και μέτρου Ελαστικότητας E_f με τις ίνες του κατά τη διεύθυνση της περιμέτρου και στο σύνολο της επιφάνειάς του. Οι λόγω διόγκωσης εγκάρσιες (κατά την ακτινική διεύθυνση) τάσεις στον μανδύα που οφείλονται στην αξονική καταπόνησή του δίνονται από την σχέση [1]:

$$\sigma_l = \frac{2 \cdot t_f}{D} \sigma_f = \frac{2 \cdot t_f}{D} E_f \cdot \varepsilon_f = \frac{1}{2} \cdot \rho_f E_f \cdot \varepsilon_f \quad (1.4.1)$$

Η σχέση αυτή δίνει ουσιαστικά τις τάσεις περίσφιγξης που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης του μανδύα σύνθετων υλικών.



Σχήμα 1.4.2: (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος περισφιγμένου από μανδύα σύνθετων υλικών και (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης [1].

Στην παραπάνω σχέση:

σ_f είναι η εφελκυστική τάση στον μανδύα

ε_f είναι η εφελκυστική παραμόρφωση στον μανδύα

ρ_f είναι το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού σύνθετων υλικών. Το ποσοστό αυτό δίνεται από το πηλίκο του εμβαδού της επιφάνειας του σύνθετου υλικού προς το εμβαδό της συνολικής επιφάνειας της διατομής σκυροδέματος:

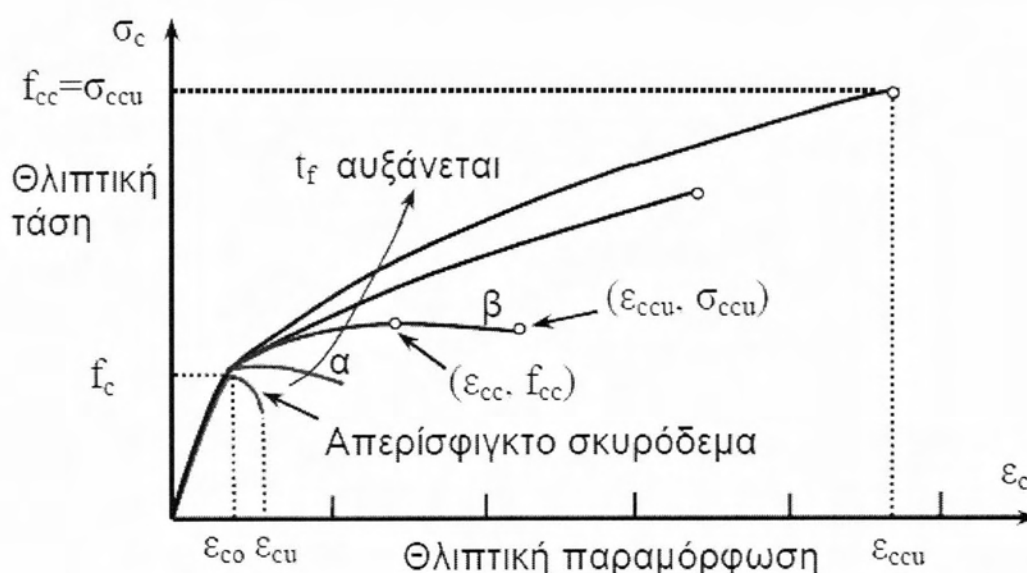
$$\rho_f = \frac{t_f \times (2\pi R/2)}{\pi R^2/2} = \frac{t_f}{R/2} = \frac{4t_f}{D} \quad (1.4.2)$$

Αποτέλεσμα των τάσεων περίσφιξης σ_l είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης και άρα η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος. Όταν η εφελκυστική τάση σ_f γίνει ίση με την αντοχή του μανδύα f_{fde} τότε έχουμε θραύση του μανδύα υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα έχει προηγηθεί η αποκόλλησή του. Η εφελκυστική αντοχή του μανδύα κατά την έννοια της περιμέτρου είναι γενικά μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών όπως αυτή μετράται μέσω δοκιμών εφελκυσμού, f_{fd} . Αυτό οφείλεται στην πολυαξονικότητα της

εντατικής κατάστασης στον μανδύα, σε τυχόν συγκεντρώσεις τάσεων σε γωνίες, στην ενδεχόμενη ύπαρξης πολλών στρώσεων αλλά και στην ποιότητα εφαρμογής του μανδύα. Η διαφορά αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω ενός μειωτικού συντελεστή η_e ο οποίος συνήθως λαμβάνει τιμές τη τάξης του 0.6 – 0.9:

$$f_{fde} = \eta_e \cdot f_{fd} \quad (1.4.3)$$

Η σχέση θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με μανδύα συνθέτων υλικών απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4.3. Η καμπύλη με κόκκινο χρώμα αναφέρεται στο απερίσφιγκτο σκυρόδεμα, ενώ οι υπόλοιπες καμπύλες παριστάνουν πως μεταβάλλεται η ικανότητα παραμόρφωσης με την αύξηση του πάχους του μανδύα.



Σχήμα 1.4.3: Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα απερίσφιγκτο και περισφιγμένο με σύνθετα υλικά μεταβλητού πάχους [1].

Μπορούν να διατυπωθούν οι εξής παρατηρήσεις [1]:

- Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης είναι περίπου διγραμμική, με αλλαγή κλίσης στην παραμόρφωση ($\epsilon_{co}=0.002$) που αντιστοιχεί στην αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος. Μέχρι εκείνο το σημείο έχουμε σύμπτωση των καμπύλων του περισφιγμένου και του απερίσφιγκτου σκυροδέματος γεγονός που υποδηλώνει

την μη ενεργοποίηση ακόμη του μανδύα. Από το σημείο αυτό ο μανδύας αρχίζει να δρα για τον περιορισμό της πλευρικής διόγκωσης.

- Αν το πάχος του μανδύα είναι σχετικά μικρό, η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ε_{cc} μικρότερη από την οριακή ε_{ccu} .
- Αν το πάχος του μανδύα είναι εξαιρετικά μικρό αυξάνεται μόνο η οριακή παραμόρφωσή του ε_{ccu} .
- Για δεδομένο τύπο συνθέτων υλικών, η αντοχή f_{cc} και η οριακή παραμόρφωση ε_{ccu} του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνονται με το πάχος του μανδύα.
- Για μανδύες ίσης δυστένειας (εκφράζεται με το γινόμενο $E_f \cdot t_f$) η αντοχή f_{cc} αυξάνεται με την οριακή παραμόρφωση του μανδύα.

1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης των FRPs

Τα σύνθετα υλικά σαφώς υπερτερούν σε κάποια σημεία, αλλά υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα σε σχέση με τους πιο κλασικούς τρόπους ενίσχυσης και επισκευής. Ξεκινώντας με τα πλεονεκτήματα, το μικρό τους βάρος και η μεγάλη εφελκυστική αντοχή είναι πιθανότατα τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματά τους έναντι των μεταλλικών ελασμάτων. Είναι πιο εύκαμπτα (έκτος απότο CFRP) και έχουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν «πλατώ» διαρροής. Η έλλειψη αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μια ψαθυρή αστοχία, η οποία δεν είναι επιθυμητή ή αποδεκτή σχεδιαστικά. Η ανυπαρξία της ταχύτατης ηλεκτροχημικής διάβρωσης των πολυμερικών ελασμάτων σε σύγκριση με τα μεταλλικά είναι αυτή που οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στον κατασκευαστικό τομέα. Παρόλα αυτά η έκθεση τους στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειώσει κάποιες μηχανικές τους ιδιότητες λόγω του αλκαλικού περιβάλλοντος ή της υπεριώδους ακτινοβολίας όπως προαναφέρθηκε. Τα FRPs εκτός από την διάθεσή τους σε σχετικά δύσκαμπτες λωρίδες (πάχους της τάξης του 1 mm) υπάρχουν και σε εύκαμπτα «υφάσματα» (πάχους της τάξης του 0, 1-0, 4 mm) τα οποία μπορούν να έρθουν σε πλήρη επαφή με το υπό ενίσχυση μέλος και να αναλάβουν όχι μόνο τα ήδη υπάρχοντα βέλη κάμψης τους αλλά και να αποκτήσουν μια καλή συνάφεια, κάτι πολύ σημαντικό και ουσιώδες για την επιτυχία της ενίσχυσης ή επισκευής, υπό την προϋπόθεση βέβαια να έχουν αγκυρωθεί σωστά με επαρκές μήκος αγκύρωσης Ένα

άλλο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι η μεγάλη ευκολία, ευελιξία και ταχύτητα εφαρμογής με την οποία επιτυγχάνεται η τεχνική ενίσχυσης, η οποία συνίσταται στην μέσω ρητινών επικόλληση των σύνθετων υλικών στις εξωτερικές επιφάνειες των υπό ενίσχυση δομικών στοιχείων. Έτσι επιτυγχάνεται η αύξηση της αντοχής και πλαστιμότητας της διατομής χωρίς να μεταβάλλεται ουσιαστικά η γεωμετρία της. Στα θετικά πρέπει να συμπεριληφθεί και το ότι υφίστανται αξιόπιστα προσομοιώματα σχεδιασμού και ένταξη στο σύστημα των ισχυόντων κανονισμών. Μάλιστα το S&P Lamela είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης H/Y για πλάκες και δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος που πρόκειται να ενισχυθούν με ελάσματα FRPs. Ένα μειονέκτημα που πρέπει να τονιστεί για τα σύνθετα υλικά είναι το υψηλό κόστος, το οποίο όμως μειώνεται, όσο η ζήτηση του υλικού αυξάνεται και η παραγωγή μεγαλώνει. Συνυπολογίζοντας και τα εργατικά, τα οποία στην περίπτωση των μεταλλικών ελασμάτων είναι προφανώς μεγαλύτερα, συνάγεται ότι το κόστος της ενίσχυσης με FRP συγκριτικά και με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η λύση είναι αποδεκτό. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η μικρή εμπειρία για το υλικό και για τις κατασκευαστικές εφαρμογές της πράξης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι έντονες ερπυστικές παραμορφώσεις αποτελούν ένα ακόμα αρνητικό της μεθόδου.

Στο χώρο των ενισχύσεων, εκτεταμένη και αρκετά δημοφιλής είναι και η χρήση επικολητών μεταλλικών ελασμάτων. Συγκεντρωτικά μπορούν να συνοψισθούν τα παρακάτω πλεονεκτήματα της εφαρμογής υφασμάτων ινοπλισμένων πολυμερών έναντι της τεχνικής επικόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων:

- **Αντοχή:** Η τελική αντοχή των ινοπλισμένων πολυμερών μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με την αναλογία των ινών τους, όμως η τελική τους αντοχή μπορεί να είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη από την τελική αντοχή του χάλυβα του ελάσματος.
- **Είδος ενίσχυσης:** Τα μεταλλικά ελάσματα μπορούν να συνεισφέρουν μόνον στην αύξηση της καμπτικής αντοχής του υπό ενίσχυση μέλους, ενώ τα υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών εκτός από την καμπτική αντοχή, μπορούν να αυξήσουν και την αντίσταση σε διάτμηση, καθώς και την πλαστιμότητα του μέλους.
- **Βάρος:** Η πυκνότητα των ινοπλισμένων πολυμερών ισούται με το 20% της πυκνότητας του χάλυβα. Έτσι, μπορούν να έχουν λιγότερο από το 10% του

- βάρους του χάλυβα ελασμάτων της ίδιας τελικής αντοχής, γεγονός που διευκολύνει την μεταφορά και την τοποθέτησή τους.
- **Μήκος:** Τα χαλύβδινα ελάσματα έχουν περιορισμένο μήκος, το μέγιστο γύρω στα 6 – 8 m, και πιθανόν να χρειάζεται συνένωση αυτών, ενώ τα υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών έχουν απεριόριστο μήκος.
 - **Συντήρηση της ενίσχυσης:** Τα μεταλλικά ελάσματα απαιτούν συντήρηση στο βάσιμο, γεγονός που προκαλεί αναστάτωση στους χρήστες της κατασκευής και επιπλέον έξοδα. Τα ινοπλισμένα πολυμερή δεν απαιτούν τέτοια συντήρηση, μειώνοντας έτσι και το κόστος ζωής της μεθόδου.
 - **Επισκευή κατεστραμμένης ενίσχυσης:** Η επισκευή ενός υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών μπορεί να γίνει ευκολότερα από αυτήν ενός κατεστραμμένου μεταλλικού ελάσματος. Ένα μεταλλικό έλασμα μπορεί να υποστεί κάποια εκτεταμένη καταστροφή από κρούση και έτσι να είναι απαραίτητη η πλήρης απομάκρυνση και αντικατάστασή του, ενώ με τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι πιθανότερο η βλάβη να είναι τοπική, αφού είναι λεπτότερα και πιο εύκαμπτα.

Πέρα από αυτά τα βασικά πλεονεκτήματα, τα σύνθετα υλικά ως σύστημα ενίσχυσης συγκεντρώνουν και τα παρακάτω:

- Πρόκειται για σύστημα ενίσχυσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε πάσης φύσεως διατομές.
- Παρέχουν την δυνατότητα στον μελετητή να χρησιμοποιήσει τα FRPs σε όποια κατεύθυνση κρίνει ότι χρειάζεται, λόγω των πολλών και διαφορετικών τρόπων διάταξης των ινών μέσα στο υλικό.
- Παρέχουν μεγαλύτερη παθητική περίσφιγξη σκυροδέματος από το χάλυβα και έμμεση βελτίωση του δεσμού σκυροδέματος και οπλισμού.
- Δεν αυξάνουν τη μορφή και τις διαστάσεις των ενισχυμένων στοιχείων λόγω του ότι το πάχος τους είναι της τάξης του χιλιοστού.
- Είναι αποτελεσματικά στην προστασία από διάβρωση.
- Προσφέρουν εσπευσμένη αντισεισμική ενίσχυση στοιχείων παλαιότερων κατασκευών με ανεπαρκή οπλισμό, τόσο διαμήκη (οπότε και εφαρμόζεται το σύστημα ενίσχυσης έναντι κάμψης όπως αναφέρθηκε παραπάνω) όσο και εγκάρσιο (οπότε εφαρμόζεται το σύστημα ενίσχυσης έναντι τέμνουσας).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Η δράση των ινοπλισμένων πολυμερών όσον αφορά την περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι γνωστή για τα ευεργετικά της αποτελέσματα. Η ακριβής όμως πρόβλεψη της συμπεριφοράς και της ικανότητας παραμόρφωσης ενός δομικού μέλους ενισχυμένου με μανδύα σύνθετων υλικών έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για πολλούς επιστήμονες διεθνώς, οι οποίοι έχουν προτείνει προσομοιώματα για τον υπολογισμό της τελικής αντοχής και ικανότητας παραμόρφωσης, υπό τη μορφή κλειστών αναλυτικών τύπων. Τα προσομοιώματα αυτά προβλέπουν για το ενισχυμένο μέλος:

- την θλιπτική τάση αστοχίας $f_{cc,u}$
- την ανηγμένη αξονική παραμόρφωση κατά την αστοχία $\varepsilon_{cc,u}$
- την ανηγμένη εγκάρσια παραμόρφωση κατά την αστοχία $\varepsilon_{lat,cc,u}$

Οι κλειστοί αναλυτικοί τύποι που υπολογίζουν τις τιμές των παραπάνω μεγεθών περιλαμβάνουν ως μεταβλητές:

- την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών f_f
- το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών E_f
- το πάχος του μανδύα t_f
- την αντοχή του απερίσφιγκτου μέλους f_{co}
- την οριακή παραμόρφωση θραύσης του απερίσφιγκτου μέλους ε_{co}
- την τάση περίσφιγξης f_r για την οποία ισχύει:

$$f_r = \frac{2t_f f_f}{D} \quad (2.1.1)$$

όπου D η διάμετρος του κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος.

2.2 Προσομοίωμα Fardis and Khalili (1982) [10]

Οι Fardis and Khalili το 1982 ήταν οι πρώτοι που εξέτασαν το φαινόμενο βελτίωσης της περίσφιγξης του σκυροδέματος με μανδύα FRPs. Διενέργησαν πειράματα θλίψης σε κυλίνδρους περισφιγμένους με ύφασμα GFRP. Υιοθέτησαν την εξής μορφή της εξίσωσης που είχε αρχικά προταθεί από τους Richart et al το 1928:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[1 + k_1 \cdot \frac{f_r}{f'_{co}} \right] \quad (2.2.1)$$

Η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων κατέληξε στην εξής τιμή του συντελεστή περίσφιγξης k_1 :

$$k_1 = 3.7 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right)^{-0.14} \quad (2.2.2)$$

οπότε προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος:

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3.7 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right)^{0.86} \quad (2.2.3)$$

Για την παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος κατά την αστοχία, οι Fardis and Khalili προτείνουν:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0.0005 \left(\frac{E_f t_f}{D \cdot f'_{co}} \right) \quad (2.2.4)$$

2.3 Προσομοίωμα Karbhari and Gao (1997) [8]

Οι Karbhari και Gao στη δημοσίευσή τους το 1997, πρότειναν δύο μοντέλα υπολογισμού των χαρακτηριστικών τελικής αντοχής σκυροδέματος περισφιγμένου με FRP. Το πρώτο μοντέλο βασίστηκε στην ανάπτυξη μιας λύσης περί της συνεισφοράς των FRP που είχε προταθεί από συνεργάτες τους παλιότερα, ενώ το δεύτερο μοντέλο ήταν ουσιαστικά μια αναδιαμόρφωση του μοντέλου που είχαν προτείνει οι Richart et al το 1928.

Πρώτο μοντέλο

Η περίσφιγξη υπό τη μορφή εξωτερικά τυλιγμένου μανδύα σύνθετων υλικών τοποθετεί το σκυρόδεμα κάτω από υδροστατική εντατική κατάσταση, ή αλλιώς υπό τριαξονική συμπίεση. Η εντατική αυτή κατάσταση έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τη θλιπτική αντοχή των υλικών (Hear 1963, Pae και Bhateja 1975, Sigley et all. 1991) μέσω της μείωσης διατμητικής τάσης και μέσω της καταστολής των μικρορωγμών και της έναρξης ρωγμών στον πυρήνα σκυροδέματος. Διάφορες αρχικές έρευνες πάνω στην αντοχή και την αξονική παραμόρφωση στην αστοχία για το σκυρόδεμα που περισφίγγεται από ενεργό υδροστατική τάση ρευστού οδήγησε στη διατύπωση των απλών εξισώσεων:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \cdot f_r \quad (2.3.1)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + k_2 \cdot \frac{f_r}{f'_{co}} \right) \quad (2.3.2)$$

όπου f'_{cc} είναι η μέγιστη αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

ε_{cc} είναι η αντίστοιχη παραμόρφωση αστοχίας υπό την πλευρική τάση ρευστού

f_r

f'_{co} και ε_{co} είναι η αντοχή και παραμόρφωση αστοχίας του απερίσφιγκτου

σκυροδέματος, αντίστοιχα,

k_1 και k_2 είναι πειραματικά προσδιοριζόμενοι συντελεστές.

Οι Richart et al 1928 υπολόγισαν τις τιμές για τους συντελεστές:

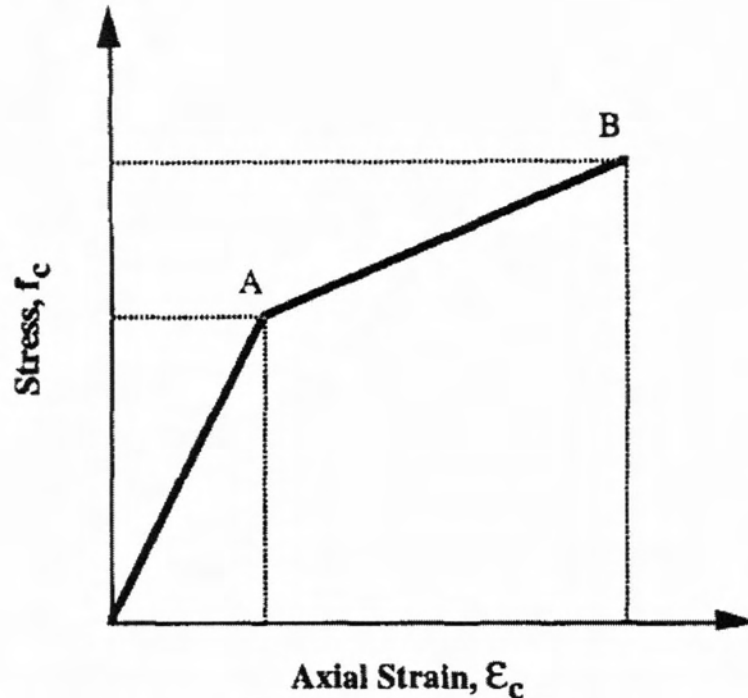
$$k_1 = 4.1 \text{ και } k_2 = 5 \cdot k_1$$

Σε προηγούμενη δημοσίευση από τον κύριο συντάκτη και τους συναδέλφους του (Hoppe et al. 1995), αναπτύχθηκε μια εξίσωση που συσχετίζει την υδροστατική εντατική κατάσταση του σκυροδέματος μέσα στο μανδύα των σύνθετων υλικών με την αξονική τάση που εφαρμόζεται με σκοπό τον καθορισμό του σημείου έναρξης των βλαβών, το οποίο αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στην αρχή της μη γραμμικής απόκρισης (σημείο A στο Σχήμα 2.3.1), η οποία είναι χαρακτηριστική της συμπεριφοράς περισφιγμένου με FRPs σκυροδέματος κάτω από την μονοαξονική θλίψη. Υποθέτοντας τη μορφή της εξίσωσης περίσφιξης 2.3.1 μέχρι το σημείο της μη γραμμικότητας, η τάση στο σημείο A καθορίστηκε να ισούται με:

$$\sigma_A = f'_{co} + 4.1 \cdot f'_{co} \nu_c \frac{2 \cdot t_f}{D} \cdot \frac{E_f}{E_c} \quad (2.3.3)$$

όπου ν_c είναι ο λόγος Poisson του σκυροδέματος

E_c είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος



Σχήμα 2.3.1: Χαρακτηριστική απόκριση τάσης – παραμόρφωσης σε σκυρόδεμα περισιγμένο με μανδύα σύνθετων υλικών υπό μονοαξονική θλίψη.

Υποθέτοντας συνολικά ελαστική απόκριση του συστήματος σκυροδέματος - FRPs μέχρι το σημείο A, η αξονική παραμόρφωση ορίζεται ως ο λόγος της τάσης στο σημείο A που διαιρεμένης με το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του περισιγμένου σκυροδέματος στην διεύθυνση του άξονα του μέλους:

$$\varepsilon^A = \frac{\sigma_A}{E^{\text{eff}}} \quad (2.3.4)$$

όπου το ενεργό μέτρο ελαστικότητας E^{eff} μπορεί να υπολογιστεί μέσω της χρήσης του κανόνα της μετασχηματισμένης διατομής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση 2.3.3 βασίζεται στο μοντέλο που προτείνεται από τους Richart et al 1928 καθώς και στην υπόθεση συνέχειας των παραμορφώσεων μεταξύ του σκυροδέματος και του μανδύα.

Το μοντέλο αυτό επεκτείνεται από τους Karbhari and Gao για να προληφθεί η τελική τάση και παραμόρφωση αστοχίας του περισιγμένου με μανδύα FRPs σκυροδέματος. Υποθέτοντας ότι ο μανδύας παρέχει περίσφιγξη υπό ενεργό έννοια μετά την έναρξη της μη γραμμικής συμπεριφοράς και ότι το σκυρόδεμα

συμπεριφέρεται σαν ασυμπίεστο υλικό (υπό μια πολύ συντηρητική έννοια), μπορεί να γραφτεί:

$$f'_{cc} = \sigma_A + f''_r \quad (2.3.5)$$

όπου f''_r είναι η δυνατή αύξηση της τάσης λόγω της ενεργούς περίσφιγξης. Ορίζοντας την τάση περίσφιγξης σ_P ως:

$$\sigma_P = \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} \quad (2.3.6)$$

όπου f_f είναι η εφελκυστική αντοχή των ινών του σύνθετου υλικού στη διεύθυνσή τους, η αύξηση τάσης κατά την αστοχία μπορεί να προσδιοριστεί ως η διαφορά μεταξύ αυτής της τάσης περίσφιγξης και της τάσης που επιτυγχάνεται κατά την αρχή της παρουσίας βλαβών:

$$f''_r = \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} - f'_{co} \nu_c \frac{2 \cdot t_f}{D} \cdot \frac{E_f}{E_c} \quad (2.3.7)$$

Αντικαθιστώντας τις 2.3.3 και 2.3.7 στην 2.3.5, η τάση κατά την αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3.1 \cdot f'_{co} \nu_c \frac{2 \cdot t_f}{D} \cdot \frac{E_f}{E_c} + \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} \quad (2.3.8)$$

Κατά την έναρξη της μη γραμμικότητας (σημείο A του Σχήματος 2.3.1) το μήκος του δοκιμίου μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$L_A = L_o [1 - (\varepsilon_z)_A] \quad (2.3.9)$$

όπου L_o είναι το αρχικό μήκος του δοκιμίου

$(\varepsilon_z)_A$ είναι η αξονική παραμόρφωση του συστήματος, που μπορεί να εκφραστεί

μέσω της 2.3.4.

Η ακτίνα καμπυλότητας στο ίδιο σημείο μπορεί να δοθεί σε όρους ακτινικής μετατόπισης $U = r \cdot \varepsilon_\theta$, όπου ε_θ είναι η ακτινική παραμόρφωση, ως εξής:

$$r_A = r_0 \cdot [1 + (\varepsilon_\theta)_A] \quad (2.3.10)$$

όπου r_0 είναι η αρχική ακτίνα καμπυλότητας του δοκιμίου.

Ο ολικός όγκος μπορεί να εκφραστεί ως:

$$V_A = L_A (\pi r_A^2) \quad (2.3.11)$$

Η ολική αστοχία του δοκιμίου υπό αξονική θλίψη θα συμβεί όταν επιτευχθεί το όριο παραμόρφωσης του μανδύα σύνθετων υλικών, $(\varepsilon_\theta)_{\text{μανδύα}}$, δηλαδή όταν $(\varepsilon_\theta)_{\text{συστήματος}} = (\varepsilon_\theta)_{\text{μανδύα}} = \varepsilon_\theta$. Η παραμόρφωση των ινών σε οποιαδήποτε στιγμή μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του νόμου του Hooke ως:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \frac{\sigma_z}{E_z} \nu_{z,\theta} - \frac{\sigma_r}{E_r} \nu_{r,\theta} \quad (2.3.12)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα E_θ, E_r είναι τα μέτρα ελαστικότητας για το σκυρόδεμα στις αντίστοιχες διευθύνσεις, ενώ E_z είναι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του συστήματος σκυροδέματος – μανδύα FRPs ($E_z = (E_c \cdot A_c + E_f \cdot A_f) / (A_c + A_f)$), όπου A_c και A_f είναι τα εμβαδά διατομής σκυροδέματος και σύνθετων υλικών με βάση τον κανόνα της μετασχηματισμένης διατομής). Η αξονική παραμόρφωση του συστήματος στην αστοχία μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$(\varepsilon_z)_{cc} = \frac{L_o - L_{\text{final}}}{L_o} \quad (2.3.13)$$

όπου L_{final} είναι το τελικό μήκος του στοιχείου. Υπό συνθήκες ασυμπίεστης παραμόρφωσης, ισχύει $V_{\text{final}} = V_A$, και

$$(\varepsilon_z)_{\text{cc}} = 1 - \frac{V_A}{(\pi r_{\text{final}}^2) \cdot L_0} \quad (2.3.14)$$

Αντικαθιστώντας τις 2.3.9 έως 2.3.11 και ορίζοντας:

$$r_{\text{final}} = r_0 \cdot [1 + (\varepsilon_\theta)_{\text{final}}] = r_0 \cdot [1 + \varepsilon_\theta] \quad (2.3.15)$$

η παραμόρφωση αστοχίας μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$(\varepsilon_z)_{\text{cc}} = 1 - \frac{[1 - (\varepsilon_z)_A] \cdot [1 + (\varepsilon_\theta)_A]^2}{[1 + (\varepsilon_\theta)_{\text{final}}]^2} \quad (2.3.16)$$

Χρησιμοποιώντας την 2.3.4 και υποθέτοντας ότι η παραμόρφωση $(\varepsilon_\theta)_A$ είναι ισοδύναμη αυτής του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, μια απλοποιητική έκφραση για την αξονική παραμόρφωση στην αστοχία σε όρους ιδιοτήτων υλικών είναι:

$$\varepsilon_{\text{cc}} = 1 - \frac{1.004 \left[1 - \frac{f'_{\text{co}}}{E_{\text{eff}}} - 4.1 \cdot f'_{\text{co}} \cdot v_c \cdot \frac{2 \cdot t_f}{D} \cdot \frac{E_f}{E_c \cdot E_{\text{eff}}} \right]}{[1 + \varepsilon_f]^2} \quad (2.3.17)$$

όπου η παραμόρφωση αστοχίας του απερίσφιγκτου σκυροδέματος ελήφθη ίση με 0.002 και η παραμόρφωση αστοχίας των ινών του σύνθετου υλικού παριστάνεται από τον όρο ε_f .

Δεύτερο μοντέλο

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι περισσότερες εμπειρικές εξισώσεις προσδιορισμού της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος έχουν τη μορφή:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \cdot f_r \quad (2.3.18)$$

Ακολουθώντας τη διαδικασία που χρησιμοποιείται από τους Cusson and Paultre (1995), διενεργήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης με τη μέθοδο των ελαχίστων απόλυτων αποκλίσεων (Least Absolute Deviations Method), χρησιμοποιώντας δεδομένα από τους Howie and Karbhari (1995) και τους Karbhari and Eckel (1994), προκειμένου να προσδιοριστεί μια σχέση της αύξησης της αντοχής του σκυροδέματος f'_{cc} / f'_{co} , και του δείκτη ενεργούς περισφιγξης f_r / f'_{co} , όπου f_r είναι η ενεργός τάση περισφιγξης που δίνεται από την:

$$f_r = \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} \quad (2.3.19)$$

Η διαδικασία αυτή κατέληξε σε μια μορφή της εξίσωσης 2.3.18 η οποία δίνεται παρακάτω:

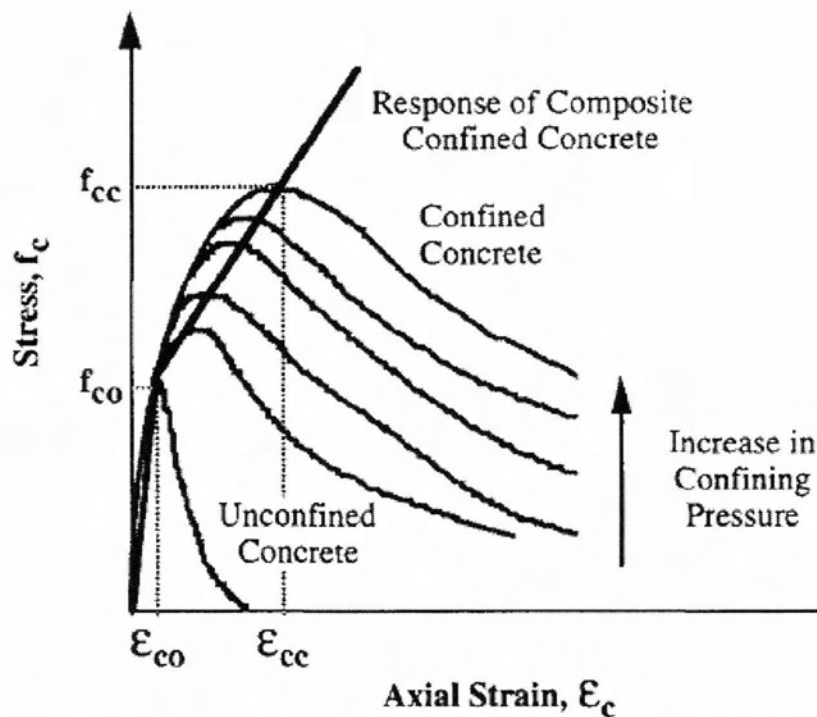
$$f'_{cc} = f'_{co} + 2.1 \cdot f'_{co} \left(\frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D \cdot f'_{co}} \right)^{0.87} \quad (2.3.20)$$

και η οποία είναι όμοια με αυτήν που προτάθηκε από τους Cusson and Paultre (1995) για σκυρόδεμα υψηλής αντοχής περισφιγμένο εγκάρσια με χαλύβδινους συνδετήρες, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής τους ήταν 0.7, ενώ για την περίπτωση μανδύα σύνθετων υλικών ο συντελεστής προτείνεται σε αυτό το μοντέλο των Karbhari and Gao να είναι 0.87.

Οι Fardis and Khalili (1982) είχαν προτείνει μία εξίσωση για την παραμόρφωση παρόμοια με αυτή που είχε αρχικά προταθεί από τους Richart et al (1928) καθώς και άλλους ερευνητές, οι οποίοι συνέδεσαν την αξονική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος με την περιμετρική δυσκαμψία του υλικού περισφιγξης σε εξίσωση της μορφής:

$$\varepsilon_u = 0.002 + 0.0005 \cdot \frac{2 \cdot E_\theta \cdot t_f}{D \cdot f'_{co}} \quad (2.3.21)$$

Παρόλα αυτά, εάν εξεταστεί η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος, είναι προφανές ότι η μη γραμμική περιοχή της καμπύλης στο Σχήμα 2.3.1 δεν επηρεάζεται στο σχήμα της από το μέτρο ελαστικότητας του μανδύα σύνθετων υλικών, αλλά καθορίζεται από την τάση περισφιγξης που αναπτύσσεται στο μανδύα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.2.



Σχήμα 2.3.2: Απόκριση τάσης – παραμόρφωσης σε περισφιγμένο σκυρόδεμα ως συνάρτηση της αυξανόμενης τάσης περισφιγξης.

Σημειώνεται ότι η περισφιγξη που ενεργοποιείται από το μανδύα εξαρτάται από το επίπεδο τάσης που επιτυγχάνεται στο ίδιο το σύνθετο υλικό, συνεπώς η μέγιστη παραμόρφωση στο περισφιγμένο σκυρόδεμα πρέπει να προσδιοριστεί ως:

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon_{c0} + 0.01 \cdot \frac{f'_r}{f'_{c0}} = \varepsilon_{c0} + 0.01 \cdot \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D \cdot f'_{c0}} \quad (2.3.22)$$

δηλαδή η παραμόρφωση αστοχίας είναι άμεσα εξαρτώμενη από την αντοχή του σύνθετου υλικού και όχι έμμεσα εξαρτώμενη μέσω της ενεργούς τάσης περισφιγξης, η οποία μπορεί να σχεδιαστεί με βάση συνδυασμούς σύνθετων υλικών και πάχους μανδύα. Η παραπάνω σχέση δεν περιλαμβάνει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου

υλικού E_f καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θεωρείται ότι αυτό δεν επηρεάζει τη μη γραμμική συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος.

2.4 Προσομοίωμα Samaan et al (1998) [12]

Οι Samaan et al (1998) αναγνώρισαν το γεγονός ότι στην περίπτωση ενίσχυσης μελών σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή, το τυπικό μοντέλο υπολογισμού που βασιζόταν στο προσομοίωμα των Mander et al (1988) υπερεκτιμούσε τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι η πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος κατά την αξονική θλίψη είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη ανάπτυξη ενός ευρέως αποδεκτού και σχετικού ακριβούς προσομοιώματος για την ενίσχυση με οπλισμό σύνθετων υλικών, το χαρακτηριστικό αυτό της συμπεριφοράς του σκυροδέματος ήταν που διαχώρισε το μοντέλο τους από τα προηγούμενα άλλων ερευνητών. Βασίστηκαν σε πειράματα αξονικής φόρτισης σε 30 κυλινδρικά δοκίμια.

Το μοντέλο τους αναπαριστά τη διγραμμική συμπεριφορά του περισφιγμένου με FRPs σκυροδέματος μέσω μιας σχέσης τεσσάρων παραμέτρων που είχε προταθεί και από τους Richard and Abbott το 1975, για τον υπολογισμό της αντοχής του σκυροδέματος όταν καταπονείται από αξονικά φορτία:

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2)\epsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\epsilon_c}{f_o}\right)^n\right]^{1/n}} + E_2\epsilon_c \quad (2.4.1)$$

όπου E_1 είναι η κλίση της πρώτης ευθείας του διγραμμικού διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων,

E_2 είναι η κλίση της δεύτερης ευθείας του διγραμμικού διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων

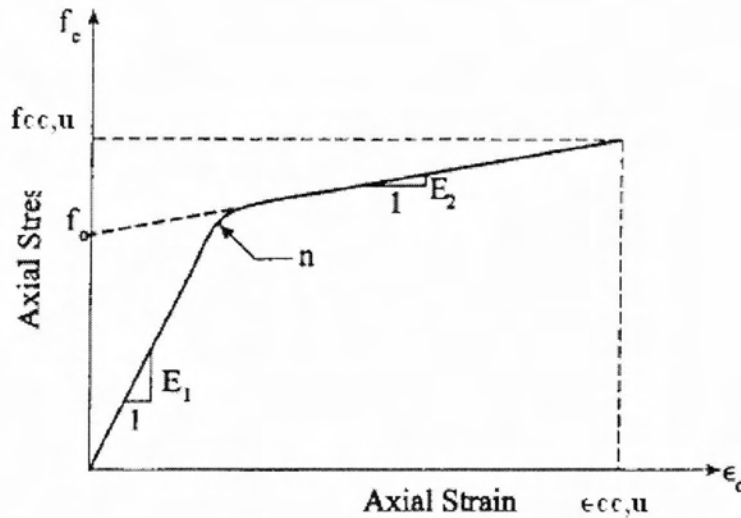
ϵ_c είναι η αξονική παραμόρφωση του σκυροδέματος

f_c είναι η τάση υπό αξονικό φορτίο του σκυροδέματος

f_o είναι η τάση που προκύπτει από την επέκταση της δεύτερης ευθείας της

καμπύλης μέχρι τον άξονα των τάσεων

n είναι παράμετρος που περιγράφει την καμπύλωση της μεταβατικής περιοχής



Σχήμα 2.4.1: Διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ και παράμετροι που χρησιμοποιεί το προσομοίωμα των Samaan et al για τις προβλέψεις των τιμών αντοχής του σκυροδέματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} σχετίζεται με την εγκάρσια τάση περίσφιξης f_r ως εξής:

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 \cdot f_r \quad (2.4.2)$$

όπου k_1 είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιξης. Για την τάση περίσφιξης ισχύει ως γνωστόν:

$$f_r = \frac{2t_f f_f}{D} \quad (2.4.3)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή k_1 οι Samaan et al μελέτησαν παλαιότερα μοντέλα και βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων κατέληξαν στην παρακάτω εξίσωση:

$$k_1 = 6(f_r)^{-0.3} \quad (2.4.4)$$

Συνεπώς η τελική σχέση για την αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος του μοντέλου είναι:

$$f_{cc} = f_{co} + 6 \cdot f_r^{0.7} \quad (2.4.5)$$

Για την μοντελοποίηση της πρώτης ευθείας του διγραμμικού διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων οι Samaan et al (1998) χρησιμοποίησαν την ίδια εξίσωση που είχε προταθεί από τους Ahmad and Shah (1982) όσον αφορά στην τιμή της παραμέτρου E_1 :

$$E_1 = 3.950 \sqrt{f_{co}} \quad (\text{GPa}) \quad (2.4.6)$$

Η τιμή E_2 (κλίση δεύτερης ευθείας διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων) προσδιορίστηκε με εμπειρικό τρόπο, με χρήση αποτελεσμάτων πειραμάτων που έγιναν από τους Samaan et al:

$$E_2 = 245.61 \cdot f_{co}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_f \cdot t_f}{D} \quad (\text{GPa}) \quad (2.4.7)$$

Στην συνέχεια οι Samaan et al υπολόγισαν την εξίσωση που δίνει την τάση f_0 και η οποία είναι συνάρτηση τόσο της αντοχής του απερίσφιγκτου σκυροδέματος f_{co} , όσο και της εγκάρσιας τάσης λόγω περισφιγξης f_r :

$$f_0 = 0.872 \cdot f_{co} + 0.371 \cdot f_r + 6.258 \quad (2.4.8)$$

Η οριακή παραμόρφωση αστοχίας $\varepsilon_{cc,u}$, προσδιορίζεται από την γεωμετρία του διγραμμικού διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων και ισούται με:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - f_0}{E_2} \quad (2.4.9)$$

2.5 Προσομοίωμα Miyauchi et al. (1999) [11]

Οι Miyauchi et al διενήργησαν πειράματα θλίψης σε 10 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος περισφιγμένα με υφάσματα ινών άνθρακα. Το σκυρόδεμα των δοκιμίων είχε τιμές αντοχής 30 MPa και 50 MPa. Οι Miyauchi et al αναδιαμόρφωσαν το μοντέλο των Richart et al (1928) προσθέτοντας έναν συντελεστή αποδοτικότητας k_e μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$f_{cc} = f_{co} + 4.1k_e \cdot f_r \quad (2.5.1)$$

Μετά από επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, η τιμή του συντελεστή αυτού βρέθηκε ίση με 0.85, οπότε η παραπάνω σχέση για τον υπολογισμό της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος γίνεται:

$$f_{cc} = f_{co} + 3.485 \cdot f_r \quad (2.5.2)$$

Χρησιμοποιώντας τα ίδια πειραματικά αποτελέσματα, προτάθηκαν δύο εξισώσεις για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 10.6 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^{0.373} \quad (2.5.3)$$

για σκυρόδεμα με αντοχή $f_{co} = 30\text{MPa}$, και:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 10.5 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^{0.525} \quad (2.5.4)$$

για σκυρόδεμα με αντοχή $f_{co} = 50\text{MPa}$. Οι συγγραφείς δεν συνιστούν κάποια αναδιαμόρφωση των εξισώσεων για περιπτώσεις τιμών αντοχής απερίσφιγκτου σκυροδέματος διαφορετικής των 30 και 50 MPa.

2.6 Προσομοίωμα Spoelstra and Monti (1999) [6]

Στην εργασία τους οι Spoelstra and Monti το 1999 προτείνουν εξισώσεις προσδιορισμού της τελικής αντοχής και παραμόρφωσης για την περίπτωση σκυροδέματος περισιγμένου με FRPs, και στη συνέχεια τις ελέγχουν με βάση μια σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων. Η δημιουργία των προσεγγιστικών αυτών εξισώσεων βασίζεται σε ανάλυση παλινδρόμησης πάνω στις τιμές των μεγεθών αντοχής και παραμόρφωσης που προκύπτουν με εφαρμογή του «ακριβούς» θεωρητικού – καίτοι σύνθετου – τρόπου προσδιορισμού τους.

Το θεωρητικό υπόβαθρο συνίσταται στις παρακάτω εξισώσεις, οι παράμετροι των οποίων αναφέρονται παραστατικά στο Σχήμα 2.6.1:

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} \left[\frac{E_{sec}(E_c - E_{sec,u})}{E_{sec,u}(E_c - E_{sec})} \right]^{1 - \frac{E_{sec}}{E_c}} \quad (2.6.1)$$

$$f'_{cu} = E_{sec,u} \varepsilon_{cu} \quad (2.6.2)$$

όπου $E_{sec} = f'_{cc} / \varepsilon_{cc}$.

Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας $E_{sec,u}$ δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{sec,u} = \frac{E_c}{1 + 2\beta \varepsilon_{ju}} = \frac{E_c}{1 + 2\beta(f_{ju} / E_j)} \quad (2.6.3)$$

όπου η παράμετρος β δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{1}{\varepsilon_{c0}} - \frac{E_c}{f'_{c0}} \quad (2.6.4)$$

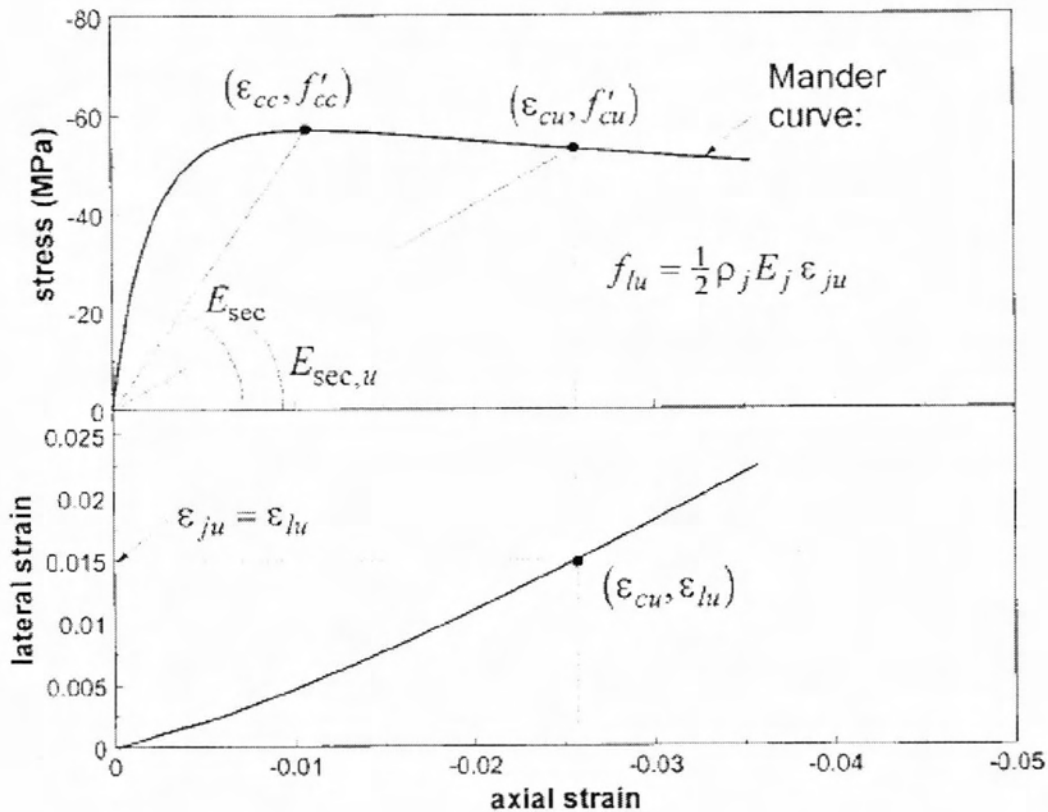
Οι παράμετροι του προσομοιώματος του Mander που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εξισώσεις είναι:

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f'_{c0}}} - 2 \frac{f_r}{f'_{c0}} - 1.254 \right) \quad (2.6.5)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right] \quad (2.6.6)$$

όπου η τελική τάση περισφιγξης ισούται με:

$$f_r = \frac{1}{2} \rho_f f_f = \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} \quad (2.6.7)$$



Σχήμα 2.6.1: Διαδικασία υπολογισμού τελικής θλιπτικής αντοχής και παραμόρφωσης περισφιγμένου με μανδύα FRPs σκυροδέματος.

Στη βάση μιας σειράς 600 περιπτώσεων εφαρμογής των παραπάνω θεωρητικών εξισώσεων, και στην σχετική ανάλυση παλινδρόμησης, οι Spoelstra and Monti προτείνουν τις εξής εξισώσεις πρόβλεψης της αντοχής και παραμόρφωσης αστοχίας του περισφιγμένου με FRPs σκυροδέματος:

$$f'_{cu} = f'_{c0} \left(0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_r}{f'_{c0}}} \right) \quad (2.6.8)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{c0} \left(2 + 1.25 \frac{E_c}{f'_{c0}} \varepsilon_f \sqrt{\frac{f_r}{f'_{c0}}} \right) \quad (2.6.9)$$

Η επιλογή των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις αυτές βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα τα οποία συνιστούν ότι η τελική αντοχή και παραμόρφωση αστοχίας εξαρτώνται άμεσα από την παραμόρφωση αστοχίας του μέσου περίσφιγξης (δηλαδή του υφάσματος σύνθετου υλικού), την μέγιστη τάση περίσφιγξης f_r και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογες με την αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος f'_{c0} . Για το λόγο αυτό ορίζονται οι εξής τρεις παράμετροι και χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εξισώσεις:

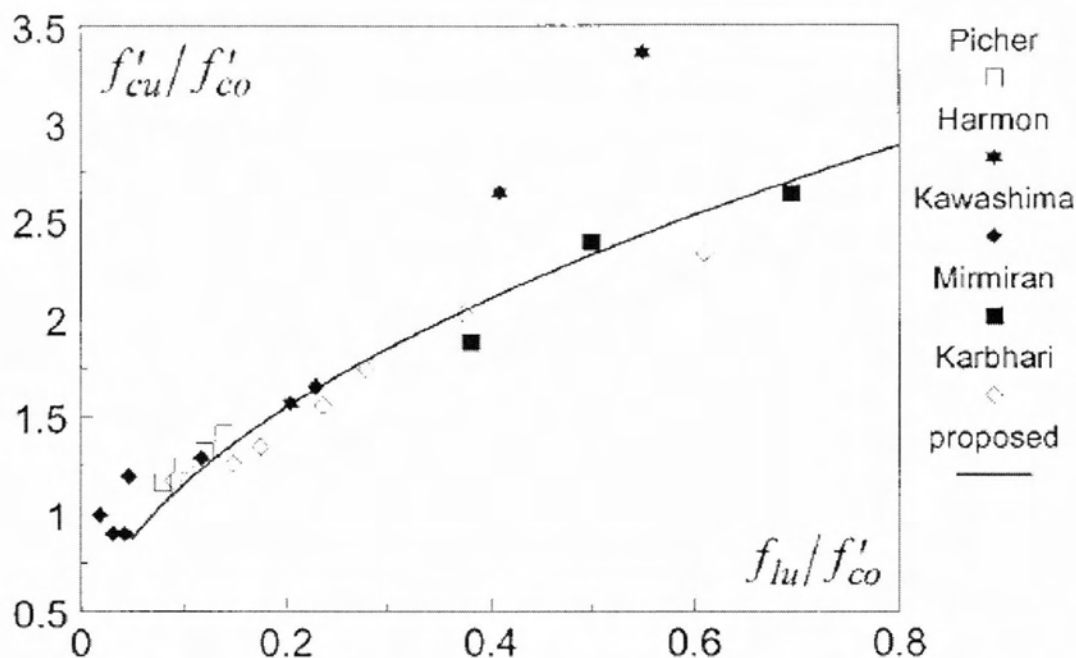
$$\bar{f}_r = \frac{f_r}{f'_{c0}}; \quad \bar{E}_c = \frac{E_c}{f'_{c0}}; \quad \varepsilon_f \quad (2.6.10)$$

Το εύρος τιμών των παραμέτρων αυτών ήταν \bar{f}_r (0-2), ε_f (0-0.03) και \bar{E}_c (700-1200MPa). Το άνω όριο της παραμέτρου \bar{f}_r , αν και ασυνήθιστα υψηλό, μπορεί να λάβει χώρα όταν για παράδειγμα ενισχυθεί ένας κύλινδρος διαμέτρου 100 mm από σκυρόδεμα 30 MPa με μανδύα πάχους 2 mm και εφελκυστικής αντοχής 1500 MPa. Έγινε επίσης η υπόθεση ότι $\varepsilon_{c0} = 0.002$.

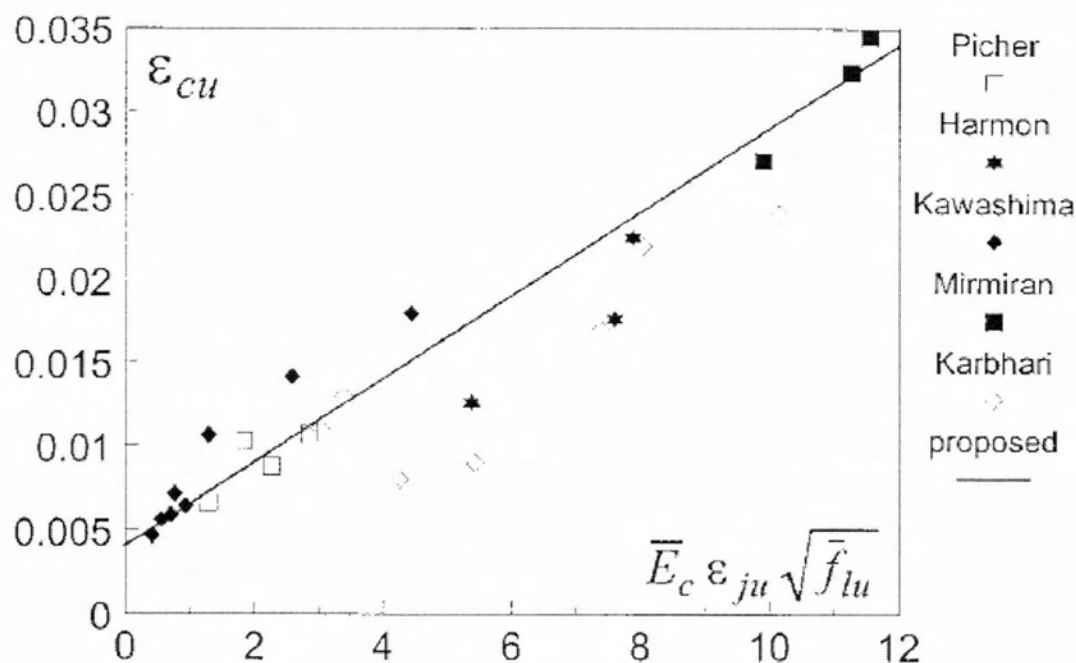
Ας σημειωθεί ότι οι παραπάνω δύο σχέσεις, για την περίπτωση μηδενικής περίσφιγξης, $\bar{f}_r = 0$, οδηγούν στις παραμέτρους του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, δηλαδή σε παραμόρφωση αστοχίας $\varepsilon_{cu} = 0.004$ και σε τελική αντοχή ίση με το 20% της μέγιστης αντοχής, που είναι και η τιμή που συνήθως καθορίζεται για την τελική αντοχή. Τονίζεται ότι η τιμή της παραμόρφωσης ε_f δεν πρέπει να λαμβάνεται από τα χαρακτηριστικά του προμηθευτή αλλά πρέπει να προσδιορίζεται ως f_f / E_f .

Οι τιμές της τελικής αντοχής και παραμόρφωσης που προκύπτουν από τις εξισώσεις που προτείνουν οι Spoelstra and Monti συγκρίνονται στην εργασία τους με τα πειραματικά δεδομένα των Picher et al 1996, Harmon et al 1995, Kawashima et al

1997, Mirmiran and Shahawy 1997, Karbhari and Gao 1997. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής δίνονται στα Σχήματα 2.3.2 και 2.3.3. Στο πρώτο Σχήμα, φαίνεται ότι η προτεινόμενη εξίσωση παρουσιάζει ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, με εξαίρεση δύο πειράματα από τους Harmon et al 1995 τα οποία έγιναν σε δοκίμια σκυροδέματος υψηλής αντοχής το οποίο βρίσκεται εκτός των ορίων που υποθέτει η παρούσα παραμετρική ανάλυση. Εξαιρουμένων αυτών των δύο περιπτώσεων, το μέγιστο σφάλμα στις προβλέψεις ήταν 9%, ενώ το μέσο σφάλμα 6%. Στο δεύτερο Σχήμα, φαίνεται ότι το σφάλμα πρόβλεψης των παραμορφώσεων αστοχίας ήταν μεγαλύτερο (περίπου 14% το μέσο), αλλά και πάλι αποδεκτό.



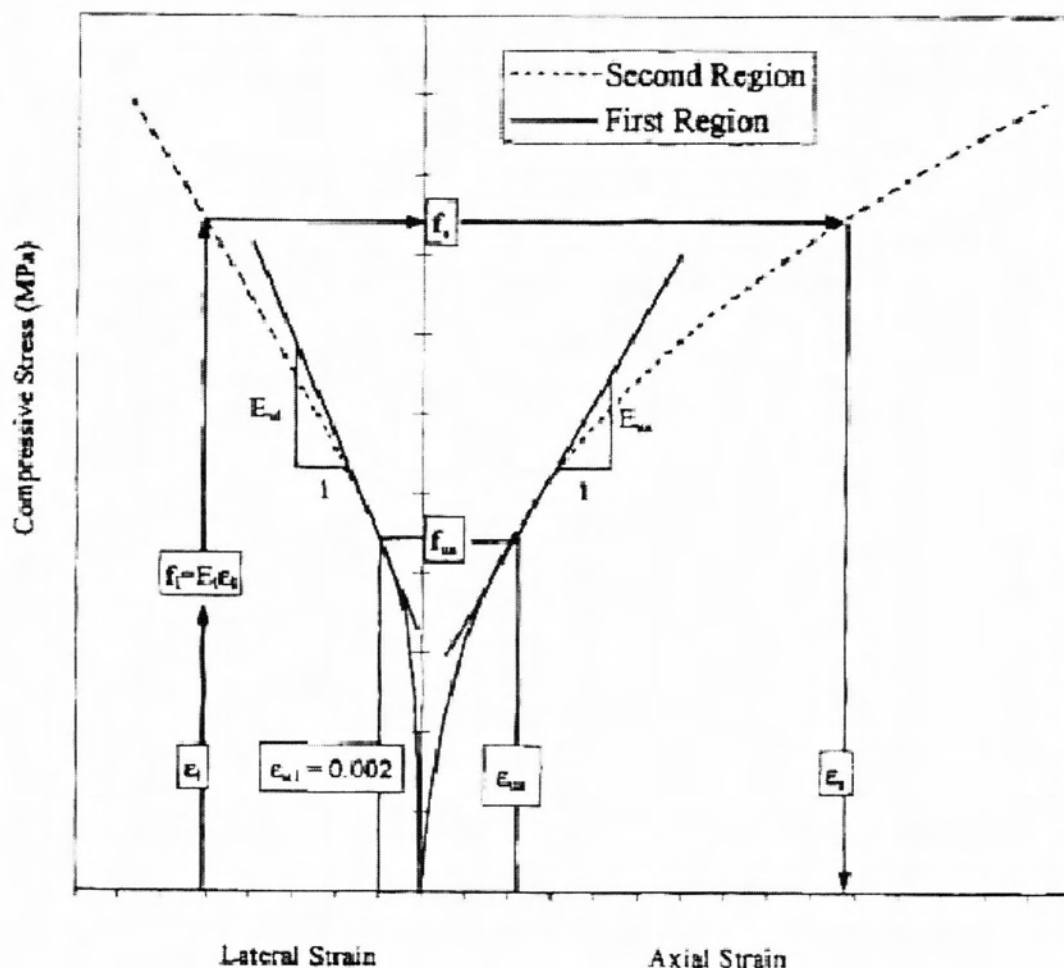
Σχήμα 2.3.2: Σύγκριση των τιμών της εξίσωσης του μοντέλου των Spoelstra and Monti για την αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος, με πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2.3.3: Σύγκριση των τιμών της εξίσωσης του μοντέλου των Spoelstra and Monti για την παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος, με πειραματικά δεδομένα.

2.7 Προσομοίωμα Toutanji (1999) [13]

Ο Toutanji, αν και δεν ήταν ο πρώτος ερευνητής που ασχολήθηκε με την ανάπτυξη προσομοιώματος περισφιγξης για την περίπτωση μανδυνών FRPs σε μέλη σκυροδέματος, ανέπτυξε ένα μοντέλο το 1999 στο οποίο έχουν γίνει έκτοτε πολλές αναφορές. Ο Toutanji για το προσομοίωμα που ανέπτυξε στηρίχθηκε στο προσομοίωμα των Richart et al (1928) και στο ευρέως αποδεκτό μοντέλο των Mander et al (1988) τα οποία αναφέρονται στην περισφιγξη του σκυροδέματος με συμβατικό χαλύβδινο οπλισμό. Ο Toutanji αναφέρει ότι το μοντέλο που προτείνει μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονάχα στην περίπτωση κυκλικών μελών με αξονικά φορτία. Το προτεινόμενο μοντέλο αποτελείται από δύο ευδιάκριτες φάσεις οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7.1, την Φάση I (συνεχής γραμμή διαγράμματος) και την Φάση II (εστιγμένη γραμμή διαγράμματος).



Σχήμα 2.7.1: Αναλυτική παρουσίαση της καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων που πρότεινε ο H. Toutanji.

Η πρώτη φάση δρα κατά τον ίδιο περίπου τρόπο με την περίσφιγξη που προσφέρουν οι χαλύβδινοι συνδετήρες, επειδή πριν την αρχή ρηγμάτωσης του σκυροδέματος (που σηματοδοτεί το τέλος της Φάσης Ι) τα φύλλα FRP δεν έχουν ενεργοποιηθεί. Σε παραμόρφωση περίπου 2‰ τα φύλλα ενεργοποιούνται και η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων εξαρτάται κυρίως από την ακαμψία των σύνθετων υλικών. Από την καμπύλη, λοιπόν, φαίνεται πως μετά την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 2‰ ξεκινάει μια γραμμή με λίγο μικρότερη κλίση. Το απερίσφιγκτο υποστύλωμα αστοχεί όταν σε αντίστοιχα υποστύλωματα που έχουν ενισχυθεί με τα ινοπλισμένα πολυμερή ενεργοποιείται ο μανδύας των FRPs.

Ο Toutanji ανέπτυξε το μοντέλο του βασίζόμενος σε πειραματικά δεδομένα από 18 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος, και προσδιόρισε εξισώσεις που δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα για την αξονική τάση - αξονική παραμόρφωση και την

αξονική τάση – εγκάρσια παραμόρφωση κυλίνδρων ενισχυμένων με ινοπλισμένα πολυμερή.

Όπως και άλλοι ερευνητές, έτσι και ο Toutanji χρησιμοποίησε τη εξίσωση των Richart et al (1928):

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_r \quad (2.7.1)$$

Ο Toutanji χρησιμοποίησε την παραπάνω σχέση αλλά ελαφρώς τροποποιημένη. Συγκεκριμένα, ενώ πολλοί ερευνητές (Richart et al, Balmer, Saatcioglu and Razvi) είχαν προτείνει μια σταθερή τιμή για τον συντελεστή k_1 (4.1 - 7.0), ο Toutanji πρότεινε μια εξίσωση για τον υπολογισμό του, η οποία προήλθε από παλινδρόμηση πειραματικών αποτελεσμάτων. Πράγματι, ότι ο συντελεστής αποδοτικότητας είναι συνάρτηση του λόγου f_l / f_{co} , δηλαδή του λόγου της τάσης περιφίγξης που ασκείται στον μανδύα των σύνθετων υλικών (ίση και αντίθετη ασκείται και στο σκυροδέμα) προς την αντοχή του σκυροδέματος. Έτσι ο συντελεστής αποδοτικότητας της περιφίγξης που πρότεινε ο Toutanji δίνεται από την έκφραση:

$$k_1 = 3.5 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^{-0.15} \quad (2.7.2)$$

και αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση προκύπτει για την αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος:

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.85} \right] \quad (2.7.3)$$

Για να υπολογίσει την αξονική παραμόρφωση σε κυλίνδρους σκυροδέματος ο Toutanji αναφέρθηκε πάλι στα προσομοιώματα των Mander et al (1988) και των Richart et al (1928).

Οι Richart et al (1928) από τα πειράματα τους διαπίστωσαν ότι η αξονική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνεται όσο αυξάνεται η τάση περισφιγξης f_r και έτσι κατέληξαν στην σχέση:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5k_1 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right) \right] \quad (2.7.4)$$

Ενώ οι Mander et al (1988) διαπίστωσαν ότι η αξονική παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.7.5)$$

Ο Toutanji με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων του, και τις δύο παραπάνω εξισώσεις και κυρίως των Mander et al, αντικατέστησε τον σταθερό συντελεστή 5 με την μεταβλητή k_2 και η εξίσωση (2.7.5) έγινε:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + k_2 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.7.6)$$

Η εξίσωση που υπολογίζει την μεταβλητή k_2 βασίστηκε πάλι σε πειραματικά αποτελέσματα και υπολογίστηκε ως:

$$k_2 = 310.57\varepsilon_f + 1.90 \quad (2.7.7)$$

όπου ε_f είναι η εγκάρσια παραμόρφωση στις ίνες του σύνθετου υλικού, η οποία κυμαίνεται από τη τιμή 2‰ έως την τελική τιμή στη αστοχία.

Αντικαθιστώντας την (2.7.7) στην (2.7.6) προκύπτει:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + (310.57 \varepsilon_r + 1.90) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.7.8)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί, ότι από τις εξισώσεις (2.7.3) και (2.7.8) μπορεί να υπολογιστεί η τάση και η αξονική παραμόρφωση σε κάθε σημείο της δεύτερης φάσης της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων, αρκεί να γνωρίζουμε την εγκάρσια παραμόρφωση του μανδύα. Για αυτό τον λόγο ο Toutanji, δεν χρησιμοποίησε τον συμβολισμό f_{cc} και ε_{cc} αλλά f_a και ε_{ca} (η διαδρομή υπολογισμού φαίνεται στο Σχ. 2.7.1 με βελάκια).

Επισημαίνεται ότι το σημείο αλλαγής της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων (φάση I \rightarrow φάση II) αντιστοιχεί σε εγκάρσια παραμόρφωση 2‰, γιατί συνήθως σε σκυρόδεμα περισφιγμένο με συνδετήρες η παραμόρφωση και η αντίστοιχη αντοχή του σκυροδέματος, λαμβάνεται ως η τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο που ο χάλυβας φτάνει την τάση διαρροής. Συνήθως ο χάλυβας φτάνει την τάση διαρροής σε παραμόρφωση περίπου 2‰ (2.17‰ για S500 και 1.74‰ για S400).

2.8 Προσομοίωμα Saafi et al (1999) [14]

Οι Saafi et al το 1999 πρότειναν ένα προσομοίωμα που ήταν όμοιο με αυτό του Toutanji (1999), με τη διαφορά ότι η επεξεργασία του έγινε στη βάση δεδομένων από πειράματα σε δοκίμια εγκιβωτισμένα σε σωλήνες FRPs, αντί για δοκίμια τυλιγμένα με υφάσματα FRPs. Ένα σύνολο 18 κυλίνδρων σκυροδέματος με σωλήνες CFRPs και GFRPs ήταν τα δοκίμια των πειραμάτων. Το αποτέλεσμα ήταν να διαφοροποιηθούν οι συντελεστές των εξισώσεων, καθώς η δύναμη συνάφειας σύνθετων υλικών – σκυροδέματος είναι μικρότερη στην περίπτωση του σωλήνα σύνθετων υλικών. Οι τιμές των συντελεστών καθώς και οι τελικές εξισώσεις του μοντέλου των Saafi et al δίνονται παρακάτω:

$$k_1 = 2.2 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^{-0.16} \quad (2.8.1)$$

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.84} \right] \quad (2.8.2)$$

$$k_2 = 537\varepsilon_f + 2.60 \quad (2.8.3)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + (537\varepsilon_f + 2.60) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.8.4)$$

2.9 Προσομοίωμα Xiao and Wu (2000) [15]

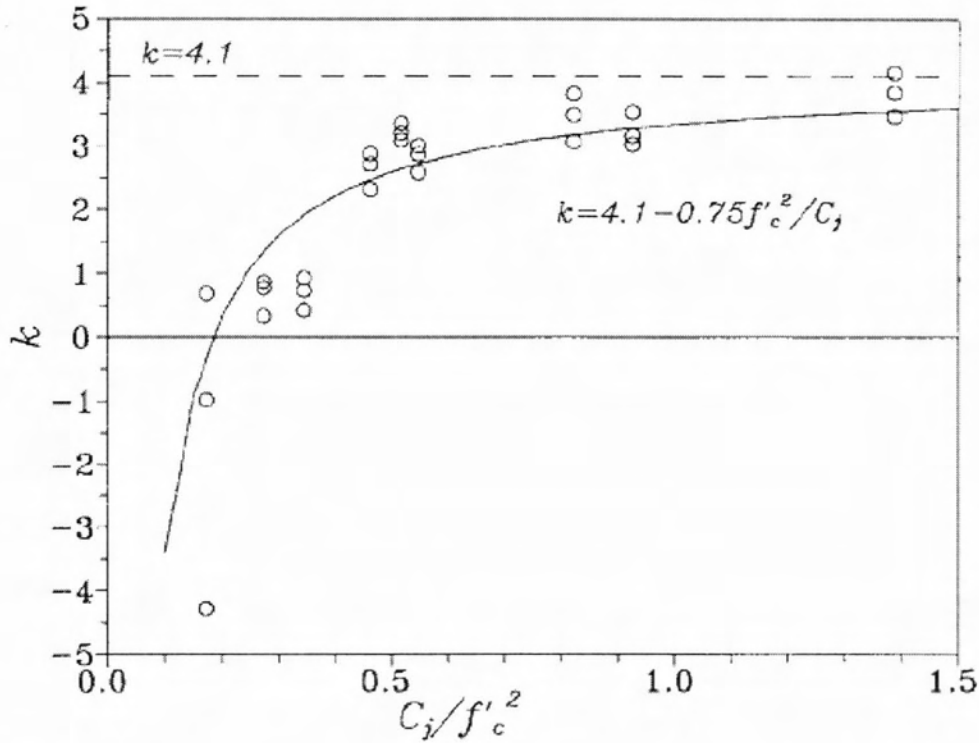
Οι Xiao and Wu στην εργασία τους παρουσιάζουν αποτελέσματα πειραμάτων σε 27 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος με μανδύες CFRP. Το μοντέλο των Xiao and Wu για την αντοχή περισιγμένων δοκιμίων δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = a + k \frac{f_r}{f_{co}} \quad (2.9.1)$$

Για τις τιμές των παραμέτρων $a = 1$ και $k = 4.1$, η παραπάνω σχέση γίνεται η γνωστή εξίσωση των Richart et al 1928. Με βάση την επεξεργασία και ανάλυση παλινδρόμησης των αποτελεσμάτων των πειραμάτων, οι Xiao and Wu προσδιόρισαν τις τιμές των παραμέτρων σε $a = 1.1$ και

$$k = 4.1 - 0.75 \frac{f_{co}^2}{C_f} \quad (2.9.2)$$

όπου $C_f = \frac{2t_f E_f}{D}$. Το Σχήμα 2.9.1 απεικονίζει την συσχέτιση της εξίσωσης 2.9.2 με τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2.9.1: Πειραματικά δεδομένα και εξίσωση παλινδρόμησης για τον συντελεστή περίσφιγξης k .

Για την τελική παραμόρφωση αστοχίας οι Xiao and Wu προτείνουν την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_{r0} - v'_c \varepsilon_{cz} \quad (2.9.3)$$

όπου η παράμετρος ε'_{r0} υπολογίστηκε βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων να έχει μια μέση τιμή -0.0005 , και η παράμετρος v'_c προσδιορίζεται βάσει της παρακάτω εξίσωσης η οποία προέκυψε από ανάλυση παλινδρόμησης:

$$v'_c = 7 \left(\frac{f_{c0}}{C_f} \right)^{0.8} \quad (2.9.4)$$

Συνεπώς η παραμόρφωση αστοχίας κατά το μοντέλο των Xiao and Wu ισούται με:

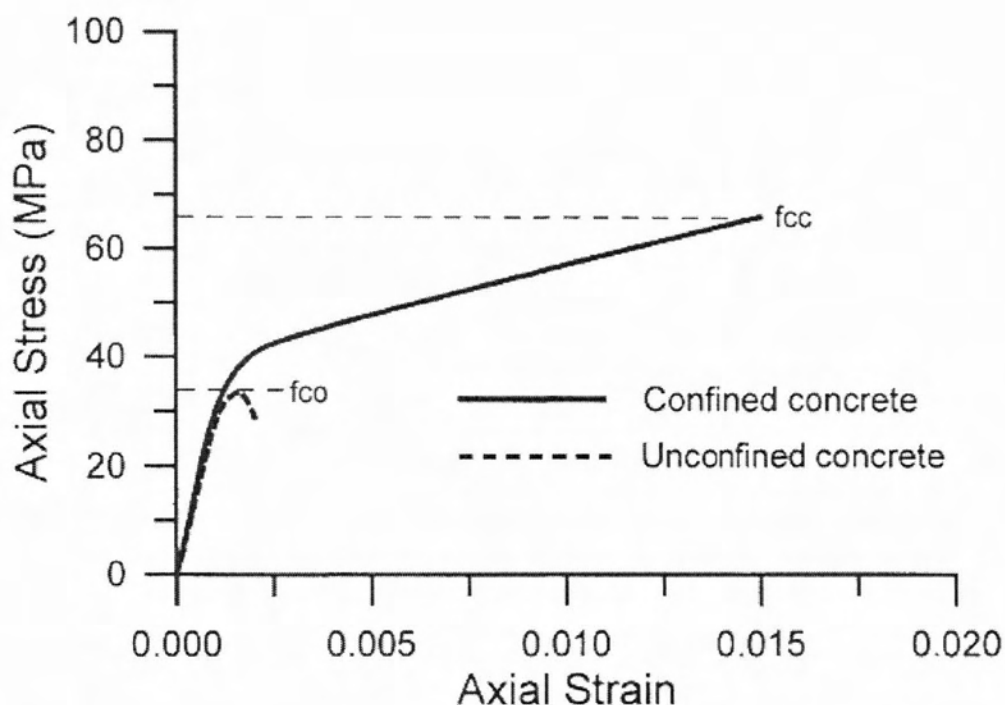
$$\varepsilon_{cc} = \frac{-\varepsilon_f - 0.0005}{7 \left(\frac{f_{co}}{C_f} \right)^{0.8}} \quad (2.9.5)$$

2.10 Προσομοίωμα Lin and Chen (2001) [7]

Στην δημοσίευσή τους το 2001 οι Lin και Chen ερευνούν την αντοχή κυλίνδρων σκυροδέματος περισφιγμένων με στρώσεις σύνθετων υλικών με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Κατ' αρχάς μελετάται η σχέση μεταξύ του αριθμού των στρώσεων σύνθετων υλικών (άνθρακα και υάλου) και της αντοχής του περισφιγμένου κυλίνδρου. Τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν στη διάθεσή τους δείχνουν ότι η αντοχή του περισφιγμένου κυλίνδρου αυξάνεται ευθέως ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων σύνθετων υλικών. Δεύτερον μελετάται η επίδραση της συσσώρευσης μίας ακολουθίας στρώσεων σύνθετων υλικών, μέσω της πειραματικής δοκιμής κυλίνδρων σκυροδέματος περισφιγμένων με εναλλάξ στρώσεις υφάσματος με ίνες υάλου και άνθρακα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων, όσο εγγύτερα είναι το ύφασμα ινών υάλου στον κύλινδρο, τόσο υψηλότερη είναι η αντοχή του περισφιγμένου κυλίνδρου. Τρίτον, εξετάζεται η επίδραση της μερικούς περιέλιξης υφάσματος ινών υάλου και άνθρακα εναλλάξ κατά το ύψος του κυλίνδρου σκυροδέματος, ούτως ώστε να ερευνηθεί πώς οι διάφορες μέθοδοι περιέλιξης διαφέρουν ως προς την επιρροή τους στην περίσφιγξη.

Το βασικότερο τμήμα της δημοσίευσης των Lin και Chen είναι η πρόταση ενός προσομοιώματος υπολογισμού της αντοχής του ενισχυμένου κυλίνδρου σκυροδέματος. Η πρόταση αυτή συνίσταται στη μορφοποίηση ενός απλού μοντέλου αστοχίας, το οποίο βασίζεται στην παρατήρηση των πειραματικών φαινομένων. Μετά από μια απλή αναφορά των εξισώσεων που συνθέτουν τα αντίστοιχα μοντέλα άλλων ερευνητών (συγκεκριμένα των Richart et al. 1928, Newman and Newman 1971, Saatcioglu and Razvi 1992, Mander, Priestley and Park 1988, Ahmad and Shah 1982, Mirmiran 1996), οι Lin και Chen διαπιστώνουν ότι τα μοντέλα αυτά βασίζονται στη μελέτη πειραματικών δεδομένων ή στη συνδυασμένη μελέτη πειραματικών δεδομένων και θεωρίας αστοχίας. Το Σχήμα 2.10.1 δείχνει ότι η σχέση τάσης –

παραμόρφωσης ενός περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος είναι σχεδόν η ίδια με αυτήν ενός απερίσφιγτου κυλίνδρου όταν η τάση είναι μικρότερη από την αντοχή του απερίσφιγτου μέλους f_{co} . Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η χαμηλή τιμή του λόγου Poisson του σκυροδέματος σημαίνει ότι η πλευρική διόγκωση ενός περισφιγμένου κυλίνδρου υπό την εφαρμογή αξονικής θλιπτικής τάσης είναι επίσης μικρή. Κατά συνέπεια, σε αυτήν τη φάση τα σύνθετα υλικά δεν έχουν καμία προφανή συμβολή στην αντοχή ενός περισφιγμένου κυλίνδρου.



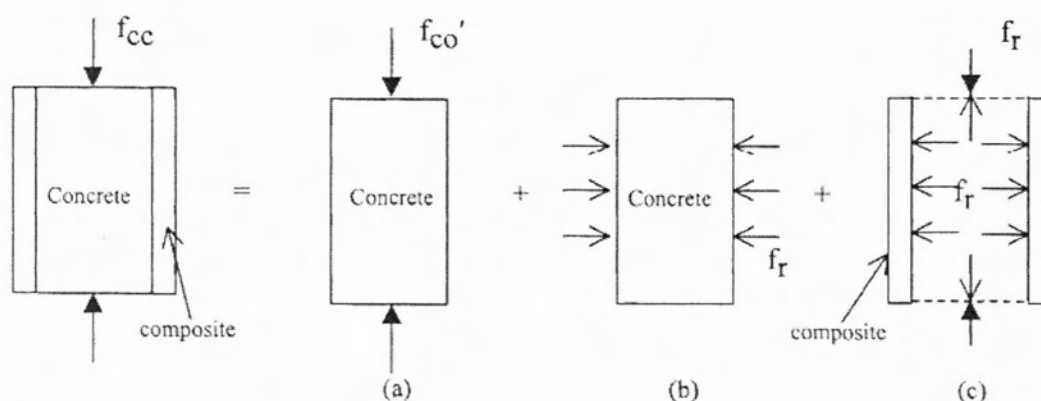
Σχήμα 2.10.1: Ένα τυπικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για ένα περισφιγμένο κύλινδρο σκυροδέματος

Εντούτοις, αφότου η τάση υπερβεί την τιμή f_{co} , η παραμόρφωση αρχίζει να αυξάνεται γρηγορότερα για κάθε αύξηση τάσης. Συνεπώς, η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης έχει ολοένα και μικρότερη κλίση. Στη συνέχεια, η τάση γίνεται γραμμικά ανάλογη προς την παραμόρφωση μέχρι την τελική αποτυχία. Άρα λοιπόν, η συμπεριφορά ενός περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος σε θλίψη μπορεί να χωριστεί σε τρεις διαφορετικές φάσεις. Κατ' αρχάς, το σκυρόδεμα αναλαμβάνει το εφαρμοζόμενο φορτίο. Δεύτερον, το σκυρόδεμα φθάνει στην τελική αντοχή του και εμφανίζεται η αρχική ρωγμή αστοχίας, η οποία στη συνέχεια μπορεί να εξελιχθεί σε ένα σύνολο ρωγμών που θα συσσωρευτούν στο σκυρόδεμα. Οι ρωγμές στο

σκυρόδεμα αυξάνουν το λόγο του Poisson και συνεπώς αυξάνεται και η πλευρική τάση περίσφιγξης μεταξύ του σκυροδέματος και των σύνθετων υλικών, σηματοδοτώντας τη στιγμή κατά την οποία υλοποιείται η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης. Τέλος, το σκυρόδεμα δεν μπορεί πλέον να αναλάβει το πρόσθετο εφαρμοζόμενο φορτίο, και σε αυτό το σημείο το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται όπως ένα πλαστικό υλικό, καθώς το αυξανόμενο φορτίο μεταφέρεται ως τάση περίσφιγξης και αναλαμβάνεται από τα σύνθετα υλικά ενίσχυσης.

Θεωρώντας έναν κύλινδρο σκυροδέματος διαμέτρου D τυλιγμένου με σύνθετα υλικά με πάχος μανδύα t_f , μπορεί να θεωρηθεί ότι η εξωτερική και εσωτερική κατανομή τάσεων του περισφιγμένου κυλίνδρου επαλληλίζεται στις εξής καταστάσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10.2:

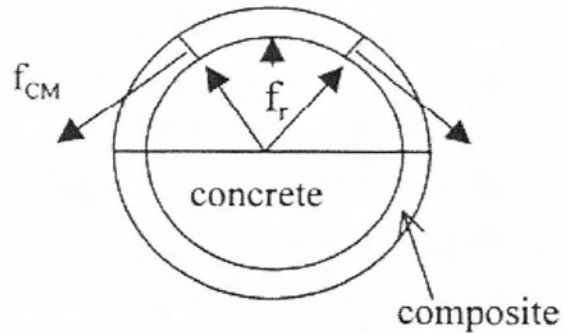
- (α) σκυρόδεμα υπό αξονική θλίψη
- (β) σκυρόδεμα υπό την τάση περίσφιγξης
- (γ) σύνθετο υλικό υπό την τάση περίσφιγξης



Σχήμα 2.10.2: Επαλληλία της εξωτερικής και εσωτερικής κατανομής τάσεων περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος

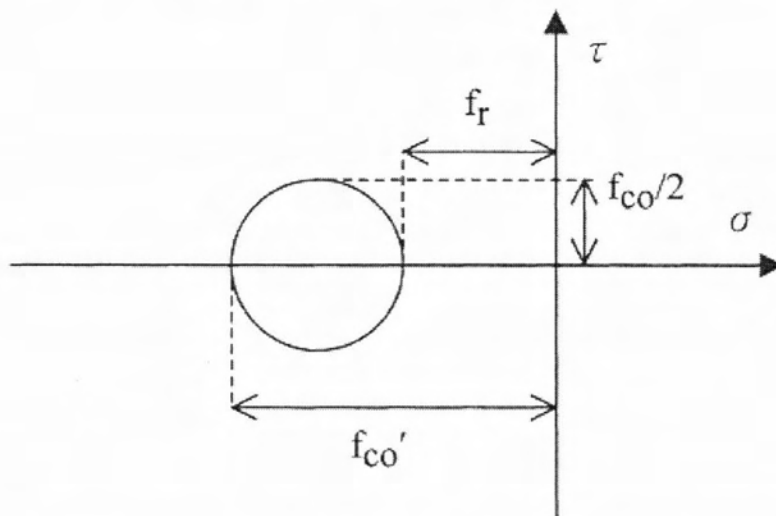
Λόγω της επίδρασης του λόγου Poisson που περιγράφηκε ανωτέρω, η επιμήκυνση των ινών του σύνθετου υλικού και η τάση περίσφιγξης αναπτύσσονται στη φάση (α), κατά την οποία το σκυρόδεμα βρίσκεται υπό αξονική φόρτιση. Ο μηχανισμός της περίσφιγξης εξαρτάται από την διάθεση διαστολής του σκυροδέματος και από την αντοχή του σύνθετου υλικού f_f , το οποίο σταματά τη διαστολή. Από την ισορροπία των δυνάμεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10.3, μπορεί να υπολογιστεί η τάση περίσφιγξης f_r :

$$f_r = \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} \quad (2.10.1)$$



Σχήμα 2.10.3: Δράση περίσφιγξης μεταξύ κυλίνδρου σκυροδέματος και σύνθετων υλικών

Κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρείται επίσης η διατμητική αστοχία ενός περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος. Ο κύκλος Mohr της τριαξονικής τάσης ενός περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος φαίνεται στο Σχήμα 2.10.4.



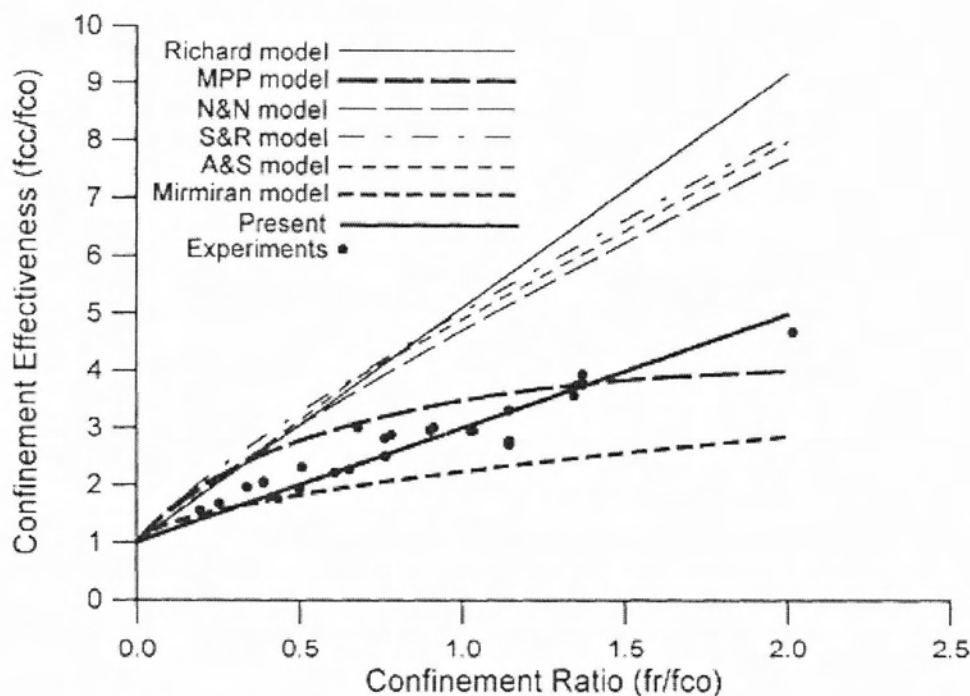
Σχήμα 2.10.4: Κύκλος Mohr της τριαξονικής τάσης ενός περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος

Στην κατάσταση (α) κατά την οποία το απερίσφιγκτο σκυρόδεμα βρίσκεται υπό αξονική θλίψη, υπάρχει μια μέγιστη κύρια τάση, f_{co} , και οι άλλες δύο κύριες τάσεις είναι ίσες με μηδέν. Στην τριαξονική εντατική κατάσταση υπό την οποία βρίσκεται το

περισφιγμένο σκυρόδεμα, η μία κύρια τάση ισούται με $f_{co} + f_r$ και οι άλλες ισούνται με f_r . Εάν η τελική αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος οφείλεται σε τέμνουσα, τότε η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, f'_{co} ισούται με $f_{co} + f_r$. Αφότου το σκυρόδεμα φτάσει σε μία ικανότητα ανάληψης φορτίου f'_{co} , δεν θα είναι σε θέση πλέον να αναλάβει περαιτέρω φορτίο. Το σύνθετο υλικό διατηρεί την ικανότητα ανάληψης φορτίου μέχρι τελικά να φθάσει στην εφελκυστική του αντοχή f_f , η οποία σχετίζεται με την τάση περίσφιγξης f_r μέσω της παραπάνω εξίσωσης. Κατά συνέπεια, ένα πολύ απλό μοντέλο αστοχίας για την θλιπτική τάση αστοχίας f_{cc} του περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$f_{cc} = f'_{co} + f_r = f_{co} + 2f_r = f_{co} + 2 \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} \quad (2.10.2)$$

Στη συνέχεια της δημοσίευσής τους, οι Lin και Chen παρουσιάζουν πίνακες στους οποίους παραθέτουν συγκριτικά τα πειραματικά αποτελέσματα συγκεκριμένων δοκιμών μαζί με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές από τα μοντέλα των ερευνητών που στην αρχή αναφέρθηκαν, καθώς και από το δικό τους από μοντέλο. Συνολικά χρησιμοποιούνται αποτελέσματα 29 πειραματικών δοκιμών. Η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης, που ορίζεται ως f_{cc} / f_{co} , και ο λόγος περίσφιγξης, που ορίζεται ως f_r / f_{co} , είναι δύο παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στα διάφορα μοντέλα αστοχίας. Η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης και ο λόγος περίσφιγξης μπορούν να είναι σε γραμμική (π.χ. Richart και παρόν μοντέλο Lin και Chen) ή μη γραμμική σχέση (MPP, N & N, S & R, A & S, Mirmiran). Το Σχήμα 2.10.5 παρουσιάζει την αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης συναρτήσει του λόγου περίσφιγξης για τα ανωτέρω αναφερόμενα μοντέλα αστοχίας καθώς επίσης και για τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την μελέτη. Σύμφωνα με αυτό το Σχήμα, τα μοντέλα των Richart, N& N, S & R και A& S υπερεκτιμούν την αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης για τον περισφιγμένο με FRPs κύλινδρο σκυροδέματος, ενώ το μοντέλο Mirmiran κάνει την υποεκτιμά. Κρίνεται επίσης ότι το παρόν μοντέλο Lin και Chen προσαρμόζεται στα πειραματικά δεδομένα καλύτερα από όλα τα ανωτέρω αναφερόμενα.

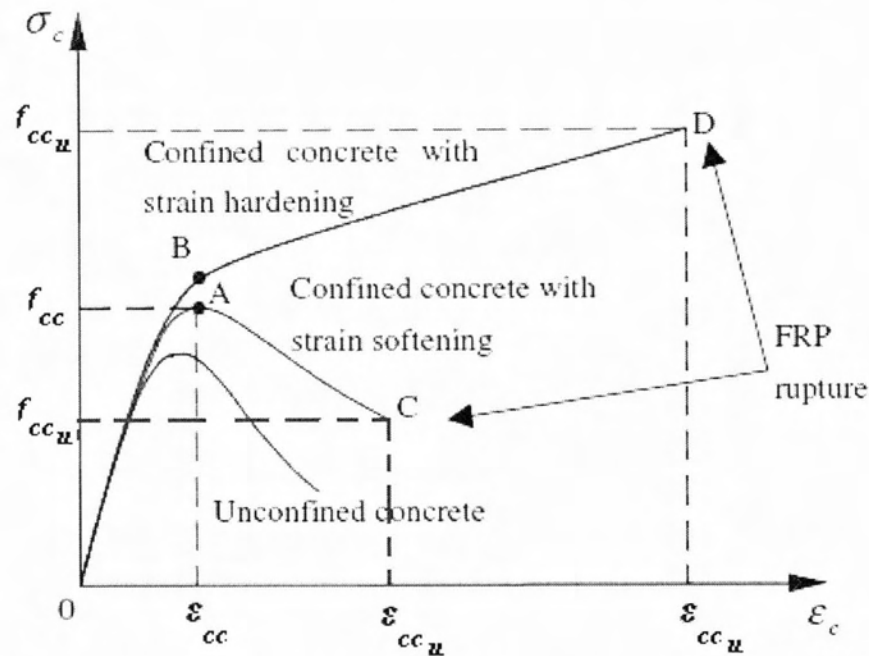


Σχήμα 2.10.5: Αποτελεσματικότητα περίσφιγξης συναρτήσει λόγου περίσφιγξης.

2.11 Προσομοίωμα Wu Lu Wu (2006) [16]

Το μοντέλο των Wu et al (2006) υπολογίζει την αντοχή f_{cc} και την αντίστοιχη ε_{cc} για περισφιγμένο σκυρόδεμα και το σημείο έναρξης της αστοχίας $f_{cc,u}$ και $\varepsilon_{cc,u}$ ανάλογα με την απόκριση του διαγράμματος σ - ε .

Συγκεκριμένα για τον υπολογισμό της αντοχής του μανδύα οι παραπάνω ερευνητές διέκριναν δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν η καμπύλη $\sigma - \varepsilon$ του περισφιγμένου στοιχείου παρουσιάζει κράτυνση ή μείωση της αποκρίσεως για $\varepsilon_c > \varepsilon_{cc}$:



Σχήμα 2.11.1: Διάγραμμα σ-ε πειραμάτων Wu et al για κράτυνση και μείωση της αποκρίσεως μανδύα

1. Για την κατηγορία που το περισφιγμένο στοιχείο παρουσιάζει κράτυνση (strain hardening) ισχύει: $f_r / f_{co} > \lambda$

όπου: $\lambda = 0.13$ για FRP με σύννηθες μέτρο ελαστικότητας

$\lambda = 0.13 * \sqrt{250 / E_f}$ για FRP υψηλό μέτρο ελαστικότητας

Διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες, ανάλογα με το εάν η αντοχή f_f των φύλλων ΙΟΠ προσδιορίζεται από τους κατασκευαστές ή από πειραματικές δοκιμές διότι σε μερικές περιπτώσεις η εφελκυστική αντοχή των FRPs που προκύπτει από τις δοκιμές ίσως είναι μεγαλύτερη από τη αντοχή που παρέχεται από τους κατασκευαστές λόγω του ότι υπάρχουν διαφορετικοί συντελεστές ασφαλείας στα διάφορα εργοστάσια.

α) Η οριακή αντοχή του μανδύα FRPs προσδιορίζεται από δοκιμές εφελκυσμού σε δείγματα από το σύνθετο υλικό που θα χρησιμοποιηθεί:

α₁) Για σύννηθες μέτρο ελαστικότητας των φύλλων CFRP:

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 0.745 + 3.357 \frac{f_r}{f_{co}} - 1.053 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^2 \quad (2.11.1)$$

Και μπορεί να απλοποιηθεί με εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης:

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 2 \frac{f_r}{f_{co}} + 1 \quad (2.11.2)$$

α₂) Για υψηλό μέτρο ελαστικότητας φύλλων CFRP ($378 \text{ GPa} \leq E_f \text{ άνθρακα} \leq 640 \text{ GPa}$)

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 1 + 2.755 \frac{f_r}{f_{co}} - 0.6 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^2 \quad (2.11.3)$$

Και μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 2.4 \frac{f_r}{f_{co}} + 1 \quad (2.11.4)$$

α₃) Για ‘σωλήνες’ FRP που χρησιμοποιούνται για περίσφιγξη σκυροδέματος:

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 1.316 + 2.098 \frac{f_r}{f_{co}} - 0.317 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^2 \quad (2.11.5)$$

Και μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 2.5 \frac{f_r}{f_{co}} + 1 \quad (2.11.6)$$

β) Η οριακή αντοχή του μανδύα FRPs προσδιορίζεται από τους κατασκευαστές:

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 0.408 + 6.157 \frac{f_r}{f_{co}} - 3.25 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^2 \quad (2.11.7)$$

Και μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$\frac{f_{cc,u}}{f_{co}} = 3 \frac{f_r}{f_{co}} + 1 \quad (2.11.8)$$

Από την μελέτη των πειραμάτων οι Wu et al διαπίστωσαν πώς ο λόγος Poisson κατά την αστοχία σχετίζεται με την οριακή παραμόρφωση, αφού ουσιαστικά είναι ο λόγος της εγκάρσιας προς την αξονική παραμόρφωση. Έτσι υπολόγισαν και τον λόγο Poisson ν_u για τον υπολογισμό του οποίου έγινε ένας παρόμοιος διαχωρισμός με αυτόν που έγινε για τον υπολογισμό των τάσεων.

α₁) Για φύλλα CFRP κοινού μέτρου ελαστικότητας, φύλλα GFRP, AFRP προκύπτει:

$$\nu_u = 0.56 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^{-0.66} \quad (2.11.9)$$

α₂) Για φύλλα CFRP υψηλού μέτρου ελαστικότητας, φύλλα GFRP, AFRP προκύπτει:

$$\nu_u = 0.56 k_1 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^{-0.66} \quad (2.11.10)$$

όπου:

k_1 είναι ο συντελεστής επιρροής του μέτρου ελαστικότητας των FRPs

Προτείνεται να είναι: $k_1=1$ όταν $E_f \leq 250$ GPa και $k_1 = \sqrt{250/E_f}$ όταν $E_f > 250$ GPa.

α₃) Για ‘σωλήνες’ περίσφιγξης σκυροδέματος CFRP και GFRP διαπιστώθηκε ότι ο λόγος Poisson είναι μικρότερος από τον λόγο Poisson για φύλλα CFRP και GFRP, αντίστοιχα. Προκύπτει λοιπόν:

$$\nu_u = 0.33 \left(\frac{f_r}{f_{co}} \right)^{-0.35} \quad (2.11.11)$$

Η οριακή αξονική παραμόρφωση των ενισχυμένων, με σύνθετα υλικά, κυλίνδρων είναι αυτή για την οποία συμβαίνει διάρρηξη των FRPs. Αφού προσδιοριστεί ο λόγος Poisson κατά την αστοχία (σύμφωνα με τα παραπάνω) υπολογίζεται η ε_{cc} ως εξής:

$$\varepsilon_{cc,u} = \frac{\varepsilon_f}{\nu_u} \quad (2.11.12)$$

2. Για την κατηγορία που το περισφιγμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει μείωση αποκρίσεως (strain softening) $\frac{f_l}{f_{co}} < \lambda$, ισχύει:

- για την μέγιστη τάση f_{cc} :

$$f_{cc} = f_{co} (1 + 0.002\alpha\lambda_1) \quad (2.11.13)$$

- για την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην f_{cc} , δηλαδή την ε_{cc} :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} (1 + 0.002\alpha\lambda_1) \quad (2.11.14)$$

όπου:

$$\alpha = \frac{f_{c30}}{f_{co}} = \frac{30}{f_{co}} \quad (2.11.15)$$

$$\lambda_1 = \frac{\rho_f E_f}{\sqrt{f_{co}}} \quad (2.11.16)$$

- για την οριακή τάση κατά την αστοχία $f_{cc,u}$:

$$f_{cc,u} = f_{co} \left(0.75 + 2.5 \frac{f_r}{f_{co}} \right) \quad (2.11.17)$$

- για την παραμόρφωση θραύσης $\varepsilon_{cc,u}$:

$$\varepsilon_{cc,u} = \varepsilon_{co} \left(1.3 + 6.3 \frac{f_r}{f_{co}} \right) \quad (2.11.18)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η διεθνής και εγχώρια βιβλιογραφία παρέχει πληθώρα δημοσιεύσεων στις οποίες οι ερευνητές παρουσιάζουν τα αποτελέσματα πειραμάτων τους με τα οποία επιχειρούν να εξετάσουν την επίδραση της ενίσχυσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος με μανδύες σύνθετων υλικών. Στις εργασίες αυτές, περιγράφουν το είδος και τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που χρησιμοποιούν, την πειραματική διαδικασία καθώς και τα αποτελέσματα των πειραμάτων, δηλαδή τις τιμές των τελικών αντοχών των δοκιμών. Οι πειραματικές αυτές εργασίες παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την πραγματική βελτίωση της συμπεριφοράς που υφίστανται μέλη οπλισμένου σκυροδέματος όταν περισφιχθούν με μανδύες σύνθετων υλικών, και αποτελούν σημείο αναφοράς στη ανάπτυξη εμπειρικών εξισώσεων πρόβλεψης αυτής της βελτίωσης.

Ενδεικτικά αναφέρεται η εργασία των Chaallal, Shahawy and Al – Saad (2000) [17], στην οποία παρουσιάζουν μια εκτενή πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς αξονικά φορτιζομένων ορθογωνικών υποστυλωμάτων περισφιγμένων με μανδύα CFRP. Οι δοκιμές τους περιλαμβάνουν 6 σειρές πειραμάτων σε 90 συνολικά δοκίμια, και η συμπεριφορά των δοκιμών εξετάζεται τόσο στην αξονική όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση. Οι παράμετροι των οποίων η επίδραση εξετάζεται είναι:

- Η αντοχή του σκυροδέματος (20.69 – 41.38 MPa)
- Ο λόγος πλευρών της διατομής ($a / b = 0.5 - 0.65 - 1$)
- Ο αριθμός των στρώσεων υφάσματος CFRP ($n = 0 - 1 - 2 - 3 - 4$)

Τα πορίσματα της εργασίας Chaallal, Shahawy and Al – Saad είναι αρκετά διαφωτιστικά όσον αφορά την επίδραση των FRPs στην περίσφιγξη και μπορούν να συνοψισθούν παρακάτω [17]:

1. Η περίσφιγξη που παρέχει ο μανδύας CFRP βελτιώνει τόσο την ικανότητα ανάληψης φορτίου όσο και την πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων, συνεπώς αποτελεί μια ενδεδειγμένη μέθοδο ενίσχυσης.
2. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος αυξάνεται με τον αριθμό των στρώσεων. Η μέγιστη αύξηση παρατηρήθηκε για λόγο πλευρών $a/b = 0.65$ για σκυρόδεμα αντοχής 20.69 MPa, και για λόγο πλευρών $a/b = 0.5$ για σκυρόδεμα αντοχής 41.38 MPa. Η μέγιστη αύξηση ήταν 86% και 31%, αντίστοιχα, σε σχέση με το απερίσφιγκτο δοκίμιο ελέγχου.
3. Η βελτίωση της συμπεριφοράς (αντοχής και πλαστιμότητας) ήταν μεγαλύτερη για τα υποστυλώματα με σκυρόδεμα αντοχής 20.69 MPa, παρά για τα υποστυλώματα με σκυρόδεμα αντοχής 41.38 MPa, σε σχέση με το απερίσφιγκτο δοκίμιο ελέγχου.
4. Γενικά, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής προκαλεί σημαντική μείωση της αξονικής παραμόρφωσης και ελαφρά μείωση της εγκάρσιας παραμόρφωσης.
5. Για δεδομένο αριθμό στρώσεων CFRP, η δυστένεια (αντίσταση στην αξονική παραμόρφωση), που εκφράζεται με την κλίση του αρχικού ελαστικού κλάδου του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων, ήταν μεγαλύτερη για τα δοκίμια αντοχής 20.69 MPa, παρά για τα δοκίμια αντοχής 41.38 MPa. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι η συνεισφορά του μανδύα CFRP είναι πιο αποτελεσματική όσο το σκυρόδεμα γίνεται λιγότερο «δύσκαμπτο».
6. Για δεδομένο αριθμό στρώσεων CFRP, η αντίσταση στην εγκάρσια παραμόρφωση ήταν παρόμοια για τα δοκίμια αντοχής 20.69 MPa και 41.38 MPa.
7. Γενικά, η αύξηση του όγκου μέχρι την αστοχία ήταν μεγαλύτερη για τα δοκίμια αντοχής 20.69 MPa, παρά για τα δοκίμια αντοχής 41.38 MPa. Επίσης, η σταθερά K (bulk modulus) που επιτεύχθηκε για το σκυρόδεμα αντοχής 20.69 MPa ήταν γενικά μεγαλύτερη από αυτήν για το σκυρόδεμα αντοχής 41.38 MPa.
8. Ο ρυθμός εγκάρσιας προς διαμήκη παραμόρφωση πριν την ρηγμάτωση ήταν κοντά στην τιμή 0.2 και για τα δύο είδη σκυροδέματος. Γενικά, για δεδομένο αριθμό στρώσεων CFRP, η μέγιστη εγκάρσια διόγκωση ήταν μεγαλύτερη για τα δοκίμια αντοχής 20.69 MPa, παρά για τα δοκίμια αντοχής 41.38 MPa. Επίσης, συνέβη σε μεγαλύτερη τιμή της αξονικής παραμόρφωσης.
9. Η δυσκαμψία του μανδύα FRPs είναι η σημαντικότερη παράμετρος στο σχεδιασμό αυτών των συστημάτων ενίσχυσης. Ο μανδύας πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτος για να αναπτύξει ικανοποιητικές δυνάμεις περίσφιγξης ακόμα και σε

σχετικά μικρές τιμές αξονικής παραμόρφωσης. Επίσης, ένας δύσκαμπτος μανδύας θα συνεισφέρει περισσότερο και καλύτερα στον έλεγχο της διόγκωσης της διατομής, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ικανότητα αξονικής παραμόρφωσης.

10. Τα πειράματα έδειξαν ότι η βελτίωση της πλαστιμότητας είναι μεγαλύτερη για κυλινδρικά δοκίμια παρά για ορθογωνικά.

Στον παρόν κεφάλαιο της εργασίας αυτής θα παρουσιαστούν πειραματικά προγράμματα τα οποία σκοπεύουν στη διερεύνηση των βελτιωμένων χαρακτηριστικών περίσφιγξης και πλαστιμότητας κυλίνδρων σκυροδέματος ενισχυμένων με στρώσεις σύνθετων υλικών από δύο διαφορετικά υλικά. Εξετάζεται έτσι η επίδραση της περιέλιξης των κυλίνδρων με δύο είδη υφασμάτων σε διάφορες διατάξεις, οι οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια σε συνδυασμό και με τα αποτελέσματα της κάθε διάταξης. Αναφέρεται ότι στη διπλωματική εργασία της Παπαϊωάννου [9] γίνεται εκτενής παρουσίαση πειραματικών προγραμμάτων στα οποία οι ερευνητές εξετάζουν κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος περισφιγμένα με μανδύα CFRP ή GFRP. Στην παρούσα εργασία η αναφορά σε πειραματικά προγράμματα θα περιοριστεί στις περιπτώσεις ενίσχυσης κυλινδρικών δοκιμίων με μανδύα αποτελούμενο από συνδυασμό υλικών CFRP και GFRP.

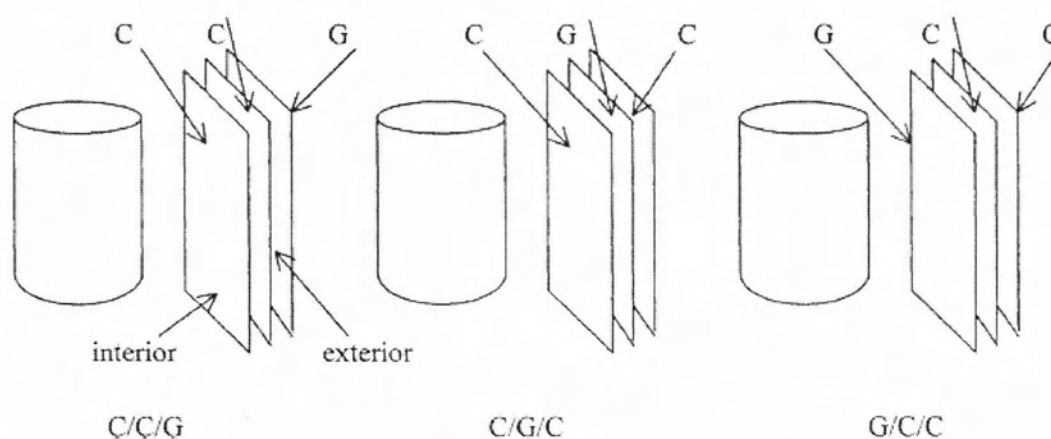
3.2 Πειράματα Lin and Chen (2001) [7]

Στην εργασία τους το 2001 οι Lin και Chen εξετάζουν την επίδραση στη βελτίωση των χαρακτηριστικών περίσφιγξης της περιέλιξης κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος με ίνες άνθρακα και γυαλιού μαζί. Τα δοκίμιά τους είναι ενισχυμένα με 3 στρώσεις υφάσματος, στις οποίες εναλλάσσουν τα υλικά του άνθρακα και του γυαλιού με διάφορους τρόπους, και σκοπός των πειραμάτων είναι η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής κατά την αστοχία των περισφιγμένων κυλίνδρων σκυροδέματος. Ο Πίνακας 3.2.1 συνοψίζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος και των σύνθετων υλικών γυαλιού και άνθρακα που χρησιμοποιούνται στα πειράματα. Στον Πίνακα αυτό, f_{co} και f_f είναι οι αντοχές του απερίσφιγτου σκυροδέματος και των σύνθετων υλικών, αντίστοιχα. Οι διαστάσεις των κυλίνδρων σκυροδέματος είναι 100 x 200 mm.

Πίνακας 3.2.1: Ιδιότητες υλικών (σκυρόδεμα, υφάσματα γυαλιού και άνθρακα) που χρησιμοποιούνται στα πειράματα των Lin and Chen [7].

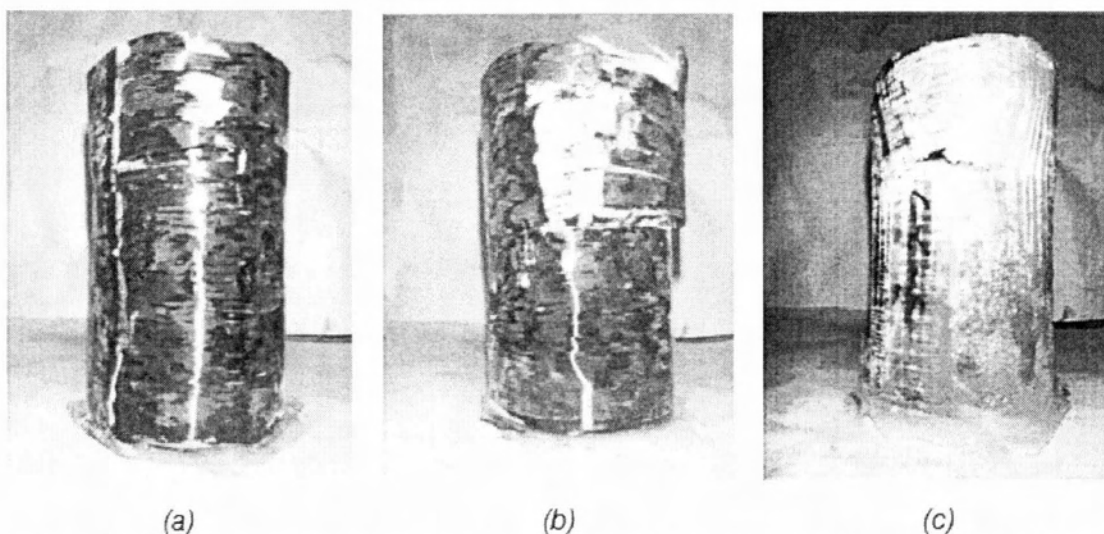
	Σκυρόδεμα	Σύνθετο υλικό άνθρακα	Σύνθετο υλικό γυαλιού
Προμηθευτής	Composite Material Lab. NAOE	Material Research Lab. ITRI	Chrong Yi Corp.
Ίνα	-	T300	L900 – E11
Μήτρα	-	Εποξειδική ρητίνη	Εποξειδική ρητίνη
Πάχος στρώσης	-	0.5 mm	0.9 mm
Αντοχή f_{co}, f_f	25.1 MPa	770.0 MPa	743.9 MPa
Μέτρο ελαστικότητας E_{co}, E_f	23.54 GPa	157.54 GPa	32.90 GPa
Διαστάσεις	100 x 200 mm	-	-

Οι κύλινδροι περιελίχθηκαν με 3 τρεις στρώσεις σύνθετου υλικού και η μορφή του τελικού μανδύα ακολούθησε δύο διατάξεις. Στην πρώτη διάταξη χρησιμοποιήθηκαν μια στρώση G (γυαλιού) και δύο στρώσεις C (άνθρακα), ενώ στην δεύτερη διάταξη χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώσεις G και μια στρώση C. Συνολικά προέκυψαν έξι περιπτώσεις επαλληλίας στρώσεων υφάσματος, οι G/C/C, C/G/C, C/C/G, G/G/C, G/C/G and C/G/G, κάποιες από τις οποίες δίνονται σχηματικά στο Σχήμα 3.2.1.

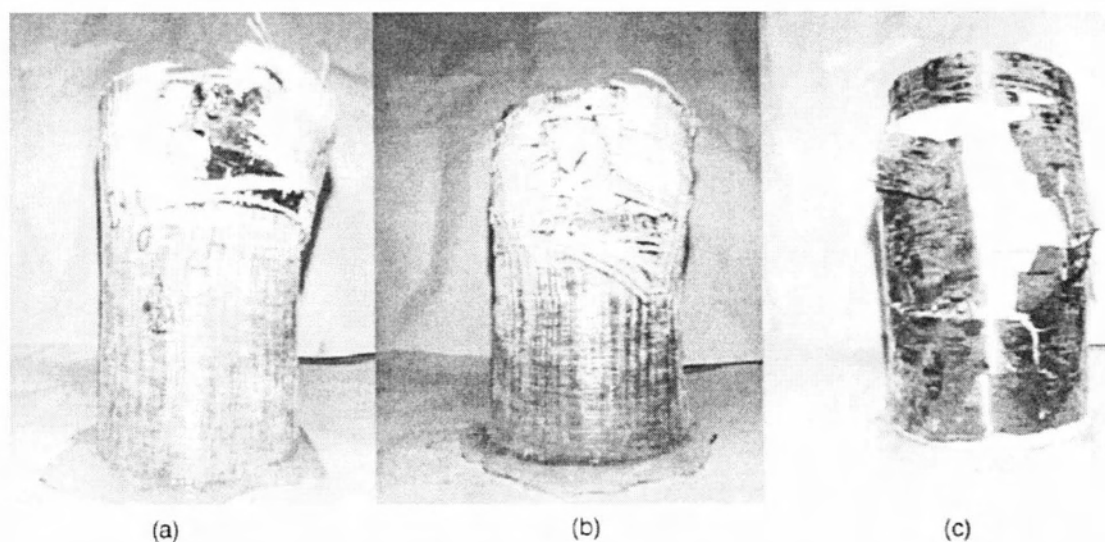


Σχήμα 3.2.1: Σχηματικό διάγραμμα περιπτώσεων επαλληλίας στρώσεων υφάσματος C (άνθρακα) και G (γυαλιού)

Τα Σχήματα 3.2.2 και 3.2.3 απεικονίζουν τα φαινόμενα αστοχίας των δοκιμίων μετά την εφαρμογή της φόρτισης, και τα αποτελέσματα για την τελική αντοχή τους δίνονται στον Πίνακα 3.2.2. Ο Πίνακας 3.2.3 συνοψίζει τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζοντας και τον αντίστοιχο, για κάθε δοκίμιο, λόγο του πάχους των στρώσεων του κάθε υλικού προς το συνολικό πάχος του μανδύα, με σκοπό να δοθούν οι υπολογισμοί στους οποίους βασίζονται τα Σχήματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.



Σχήμα 3.2.2: Τρόπος αστοχίας μανδύα σύνθετων υλικών με επαλληλία: (a) G/C/C (b) C/G/C και (c) C/C/G.



Σχήμα 3.2.3: Τρόπος αστοχίας μανδύα σύνθετων υλικών με επαλληλία: (a) C/G/G (b) G/C/G και (c) G/G/C.

Πίνακας 3.2.2: Πειραματικές τιμές αντοχής κυλίνδρων σκυροδέματος περισφιγμένων με μανδύα σύνθετων υλικών από στρώσεις C (άνθρακα) και G (γυαλιού) [7].
Μονάδες: MPa

Δοκίμιο	C/C/G	C/G/C	G/C/C	C/G/G	G/C/G	G/G/C
1	68.2	62.1	82.7	91.2	94.0	100.5
2	67.3	80.1	86.8	95.9	95.9	100.4
3	68.0	65.8	78.9	93.8	95.1	94.8
Μέση Τιμή	67.8	69.3	82.8	93.6	95.0	98.6

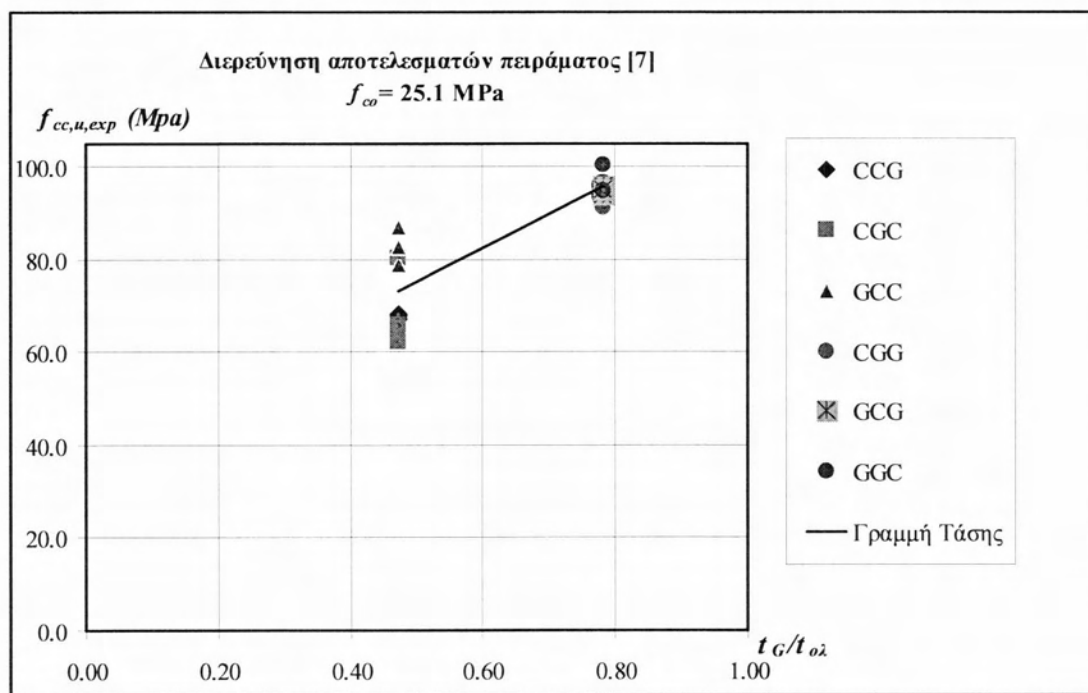
Πίνακας 3.2.3: Πειραματικές τιμές [7] αντοχής κυλίνδρων σκυροδέματος περισφιγμένων με μανδύα σύνθετων υλικών από στρώσεις C και G.

Δοκίμιο	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	n_G	n_C	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	68.20	1	2	0.47	0.53
C/C/G	67.30	1	2	0.47	0.53
C/C/G	68.00	1	2	0.47	0.53
C/G/C	62.10	1	2	0.47	0.53
C/G/C	80.10	1	2	0.47	0.53
C/G/C	65.80	1	2	0.47	0.53
G/C/C	82.70	1	2	0.47	0.53
G/C/C	86.80	1	2	0.47	0.53
G/C/C	78.90	1	2	0.47	0.53
C/G/G	91.20	2	1	0.78	0.22
C/G/G	95.90	2	1	0.78	0.22
C/G/G	93.80	2	1	0.78	0.22
G/C/G	94.00	2	1	0.78	0.22
G/C/G	95.90	2	1	0.78	0.22
G/C/G	95.10	2	1	0.78	0.22
G/G/C	100.50	2	1	0.78	0.22
G/G/C	100.40	2	1	0.78	0.22
G/G/C	94.80	2	1	0.78	0.22

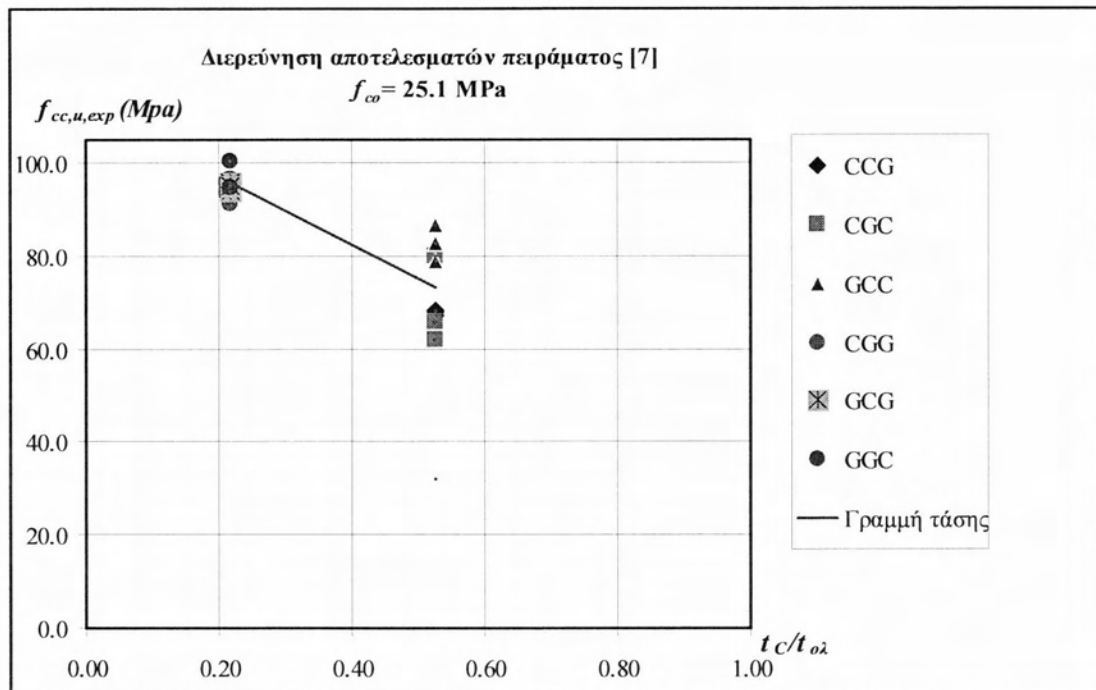
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Πινάκων, τα οποία απεικονίζονται παραστατικά και στα Σχήματα 3.2.4 και 3.2.5, η αντοχή των κυλίνδρων σκυροδέματος παρουσιάζεται μεγαλύτερη όταν το ύφασμα ινών γυαλιού είναι εγγύτερα στο σκυρόδεμα, δηλαδή όταν το ύφασμα γυαλιού είναι η εσωτερική (interior) στρώση του μανδύα. Επίσης είναι μεγαλύτερη η αντοχή για τις περιπτώσεις ύπαρξης δύο στρώσεων ινών γυαλιού από ότι για τις περιπτώσεις δύο στρώσεων ινών

άνθρακα (π.χ. η διάταξη C/G/G είναι πλεονεκτικότερη όσον αφορά στη βελτίωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος από ότι η C/C/G). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται στην εγγενή ψαθυρότητα του σύνθετου υλικού με ίνες άνθρακα, καθώς οι ρωγμές που συσσωρεύονται στο σκυρόδεμα κατά την αύξηση του φορτίου οδηγούν τις ίνες άνθρακα στην αστοχία.

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται γραφικά τα πειραματικά αποτελέσματα σε διαγράμματα με κατακόρυφο άξονα την μετρούμενη αντοχή των περισφιγμένων κυλίνδρων και οριζόντιο άξονα το λόγο του πάχους των στρώσεων G προς το ολικό πάχος του μανδύα στο Σχήμα 3.2.4 και το λόγο του πάχους των στρώσεων C προς το ολικό πάχος του μανδύα στο Σχήμα 3.2.5. Φαίνεται παραστατικά πως η αύξηση του ποσοστού του πάχους του στρώσεων γυαλιού οδηγεί στην αύξηση της αντοχής, ενώ η αύξηση του ποσοστού του πάχους του στρώσεων άνθρακα οδηγεί στην μείωση της αντοχής.



Σχήμα 3.2.4: Μεταβολή θλιπτικής αντοχής κυλίνδρων πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.



Σχήμα 3.2.5: Μεταβολή θλιπτικής αντοχής κυλίνδρων πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

3.3 Σύγκριση πειραμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιωμάτων

Στη συνέχεια, τα πειραματικά αποτελέσματα θα συγκριθούν με τις προβλεπόμενες τιμές των αντοχής που προκύπτουν από την εφαρμογή των προσομοιωμάτων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας. Προκύπτει στο σημείο αυτό το ζήτημα του πώς θα εφαρμοστούν τα αναλυτικά αυτά μοντέλα (τα οποία είναι σχεδιασμένα για 1 υλικό μανδύα) στην περίπτωση δοκιμίων με μανδύα δύο υλικών. Τα αναλυτικά μοντέλα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά του μανδύα: E_f , t_f , f_f , συνεπώς το ερώτημα είναι πώς θα οριστούν οι τιμές αυτών των παραμέτρων όταν υπάρχουν δύο διαφορετικά σύνθετα υλικά. Ξεκινώντας από τον ορισμό της τάσης περίσφιγξης λόγω του μανδύα, η οποία ισούται με:

$$f_r = \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D} \quad (3.2.1)$$

παρατηρείται ότι το γινόμενο $f_f \cdot t_f$ παριστάνει τη συνολική εφελκυστική δύναμη που δύναται να αναλαμβάνει ο μανδύας. Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο διαφορετικά

σύνθετα υλικά, με διαφορετικές τιμές πάχους και εφελκυστικής αντοχής, προφανώς δεν γίνεται το σύνολο του πάχους του μανδύα να βρίσκεται υπό την ίδια μέγιστη τάση, καθώς οι ίνες του ενός υλικού θεωρητικά αστοχούν πριν τις ίνες του δεύτερου υλικού. Το δεδομένο είναι ότι όλες οι στρώσεις των σύνθετων υλικών θα βρίσκονται υπό την ίδια παραμόρφωση, ώστε να ισχύει η συνέχεια των παραμορφώσεων στο μανδύα. Μια προσέγγιση η οποία θα θεωρούσε το μανδύα σαν σύνθετη διατομή και θα υπολόγιζε ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας και τάση λειτουργίας για κάθε υλικό δεν είναι εύκολο να διευθετηθεί, καθώς δεν είναι εκ των προτέρων γνωστός ο τρόπος συνεργασίας των δύο διαφορετικών υλικών. Επίσης, οι ιδιότητες του σύνθετου υφάσματος που προκύπτουν από την εναλλάξ τοποθέτηση υφάσματος των δύο υλικών και κόλλας ξεπερνούν την κλασσική παραδοχή του μετασχηματισμού της διατομής. Τέλος, σημειώνεται πως οι σχέσεις των προσομοιωμάτων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2 δεν προκύπτουν από την ακριβή ανάλυση της διατομής που λαμβάνει υπόψη την ισορροπία δυνάμεων και κατανομή παραμορφώσεων, αλλά είναι καθαρά εμπειρικές. Προκύπτουν από ανάλυση παλινδρόμησης η οποία διενεργείται ώστε με βάση τις δεδομένες τιμές των παραμέτρων των δοκιμίων (αντοχή απερίσφιγκτου σκυροδέματος, διαστάσεις δοκιμίου, χαρακτηριστικά σύνθετου υλικού), να παραχθούν εξισώσεις πρόβλεψης των τελικών τιμών αντοχής και παραμόρφωσης του περισφιγμένου δοκιμίου. Συνεπώς, ο ορισμός των χαρακτηριστικών του σύνθετου υλικού για την περίπτωση μανδύα αποτελούμενου από δύο διαφορετικά υλικά γίνεται με αντικατάσταση των παραμέτρων του κάθε υλικού ως εξής:

$$f_f \cdot t_f \rightarrow f_{f,G} \cdot t_{f,G} + f_{f,C} \cdot t_{f,C}$$

Παρατηρείται ότι η υπόθεση αυτή χρησιμοποιείται και στην εργασία των Lin and Chen [7], στον Πίνακα 6 της σελίδας 1592, όπου δίνονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου τους ($f_{cc} = f'_{co} + f_r = f_{co} + 2f_r = f_{co} + 2 \frac{2 \cdot f_f \cdot t_f}{D}$). Στην περίπτωση δοκιμίων με μανδύα δύο υλικών, αντικαθιστούν το γινόμενο $f_f \cdot t_f$ με το $f_{f,G} \cdot t_{f,G} + f_{f,C} \cdot t_{f,C}$, δηλαδή θεωρούν ότι το κάθε υλικό βρίσκεται υπό τάση ίση με την εφελκυστική αντοχή του. Πράγματι, για 2 στρώσεις C με πάχος στρώσης 0.5 mm και 1 στρώση G με πάχος στρώσης 0.9 mm, σε κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 100

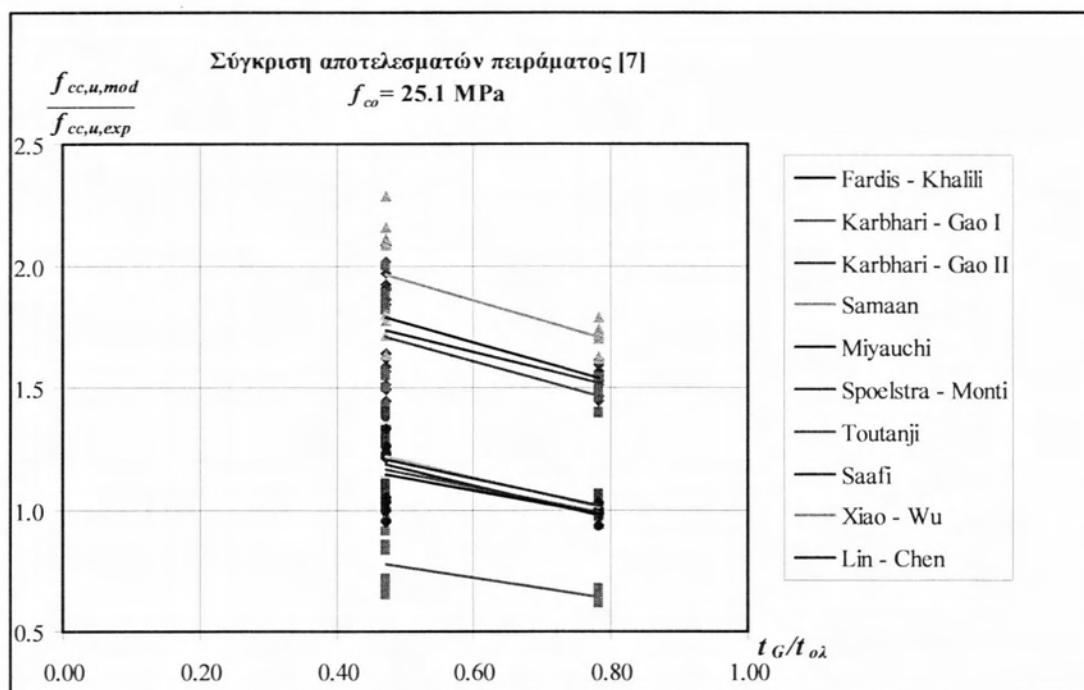
mm και αντοχής απερίσφιγκτου σκυροδέματος 25.1 MPa, η εφαρμογή της παραπάνω υπόθεσης δίνει:

$$f_{cc} = f_{co} + 4 \frac{f_f \cdot t_f}{D} = 25.1 + 4 \frac{(770 \cdot 2 \cdot 0.5) + (743.9 \cdot 0.9)}{100} = 82.6 \text{ MPa}$$

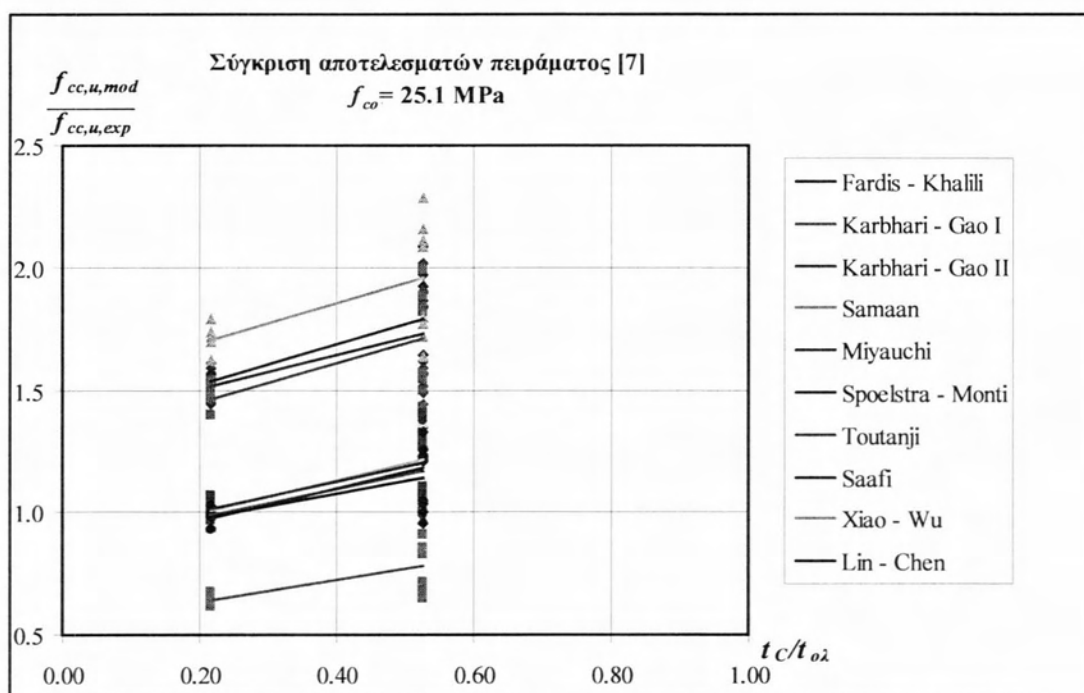
που συμπίπτει με την τιμή αντοχής που αναφέρεται στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 6 ως η προβλεπόμενη από το μοντέλο των Lin and Chen αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος.

Επίσης, παρατηρείται ότι η προβλεπόμενη από το μοντέλο αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι η ίδια για δεδομένο αριθμό στρώσεων G και C στο μανδύα, ανεξαρτήτως της διάταξης (σειράς) με την οποία τοποθετούνται οι στρώσεις. Έτσι, για τα δοκίμια με μανδύα G/C/C, C/G/C και C/C/G η τιμή της αντοχής που υπολογίζεται μέσω του προσομοιώματος είναι η ίδια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα προσομοιώματα δεν περιλαμβάνουν ως παράμετρο την επίδραση της σειράς τοποθέτησης των στρώσεων του κάθε υλικού, καθώς δημιουργήθηκαν στη βάση της χρησιμοποίησης ενός υλικού για το μανδύα.

Στα παρακάτω Σχήματα απεικονίζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων των Lin and Chen [7] με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές των προσομοιωμάτων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2. Στον κατακόρυφο άξονα δίνονται οι λόγοι της προβλεπόμενης από το μοντέλο τιμής προς την πειραματική τιμή, $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$. Οι υπολογισμοί στους οποίους βασίζονται αυτά τα διαγράμματα δίνονται στο Παράρτημα Β υπό τη μορφή Πινάκων.



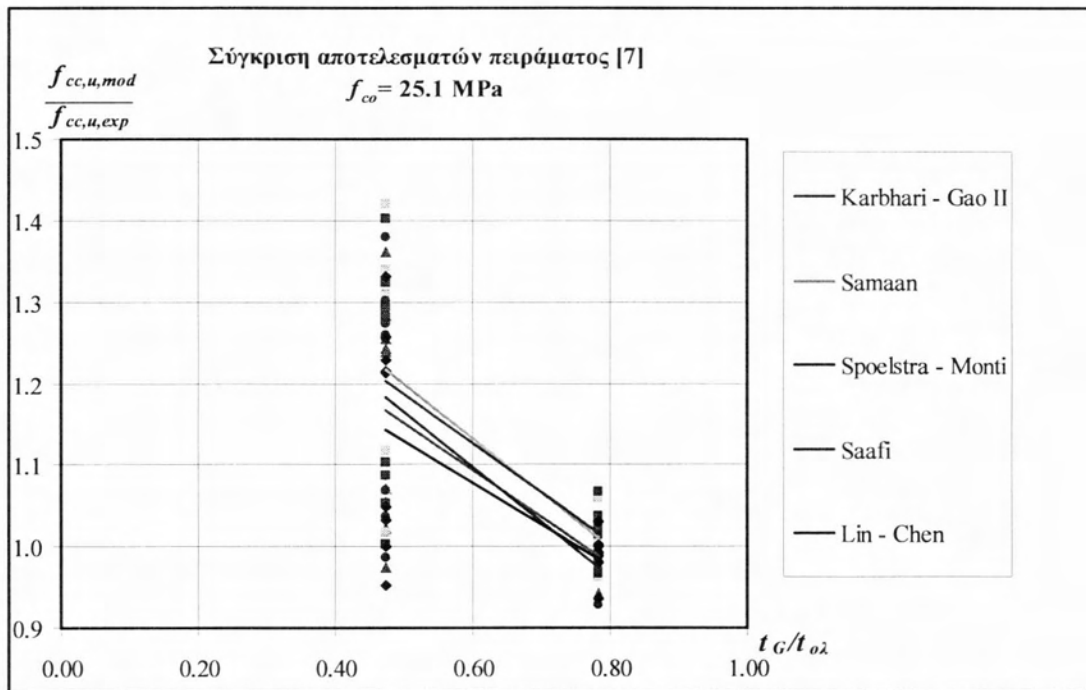
Σχήμα 3.2.6: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.



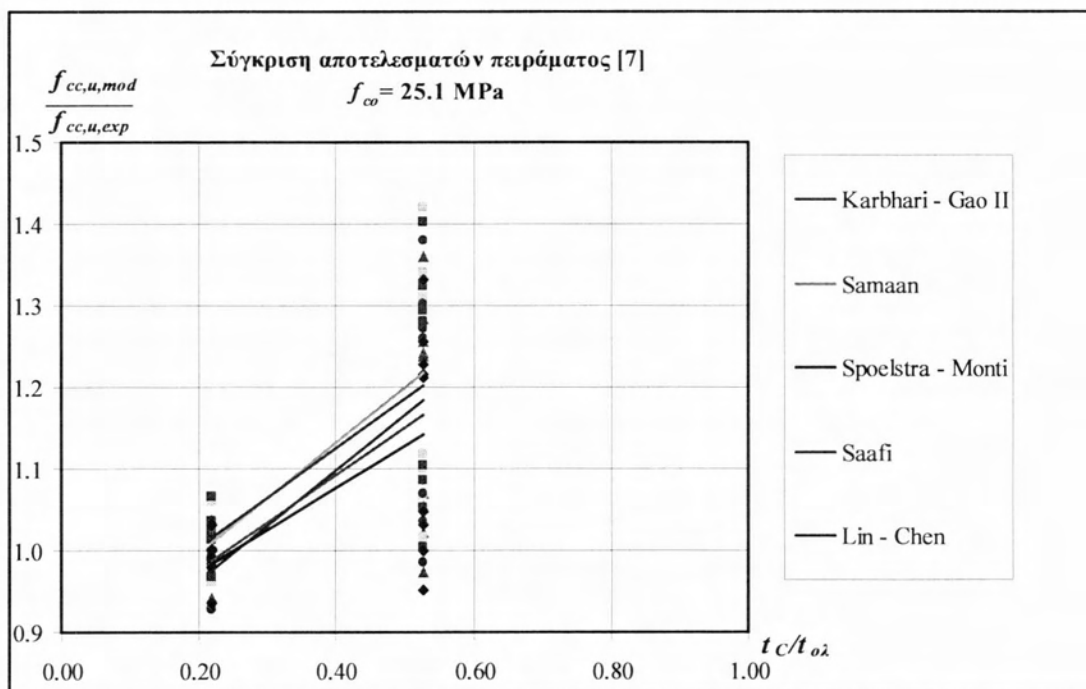
Σχήμα 3.2.7: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Η παρατήρηση των δύο παραπάνω σχημάτων καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

- Όλα τα προσομοιώματα, εκτός από αυτό των Karbhari and Gao I παρέχουν υπερεκτιμημένες προβλέψεις αντοχής στην οριακή κατάσταση αστοχίας.
- Περισσότερο ακριβείς προβλέψεις, σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, δίνουν 5 συνολικά μοντέλα: των Karbhari and Gao II, Samaan, Spoelstra – Monti, Saafi, Lin – Chen, καθώς οι αντίστοιχες προσαρμοσμένες γραμμές είναι κοντά στην περιοχή της τιμής «1» του κατακόρυφου άξονα. Τα μοντέλα αυτά απομονώνονται και δίνονται στα επόμενα Σχήματα με μικρότερο εύρος τιμών στον κατακόρυφο άξονα, για να είναι πιο ευδιάκριτα.
- Η αύξηση του λόγου t_c/t_{0L} οδηγεί στη μείωση της απόκλισης της τιμής των προσομοιωμάτων σε σχέση με την πειραματική τιμή, ενώ αντίθετα η αύξηση του λόγου t_c/t_{0L} οδηγεί στην αύξηση της απόκλισης της τιμής των προσομοιωμάτων σε σχέση με την πειραματική τιμή.
- Το προσομοίωμα των Lin and Chen, όπως εξάλλου αναμενόταν, δίνει τις πιο ακριβείς προβλέψεις, καθώς η αντίστοιχη γραμμή είναι πλησιέστερα στην τιμή «1» του κατακόρυφου άξονα σε σχέση με τις γραμμές των άλλων προσομοιωμάτων. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το προσομοίωμα των Lin and Chen αναπτύχθηκε στη βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα οποία τώρα συγκρίνεται. Αξιοσημείωτο πάντως είναι και το γεγονός ότι 4 ακόμα προσομοιώματα, τα οποία μάλιστα αναπτύχθηκαν στη βάση πειραμάτων σε κυλίνδρους με μανδύες από 1 μόνο υλικό, παρέχουν εξίσου ακριβείς προβλέψεις. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται στο επόμενο Κεφάλαιο για τον υπολογισμό των τιμών αντοχής και παραμόρφωσης αστοχίας που αναμένονται σε μελλοντική εκτέλεση ενός προτεινόμενου πειραματικού προγράμματος. Δίνεται έτσι μια εκτίμηση των αναμενόμενων βελτιωμένων χαρακτηριστικών περίσφιγξης των συγκεκριμένων δοκιμίων που θα εξεταστούν στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα.



Σχήμα 3.2.8: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.



Σχήμα 3.2.9: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα εξεταζόμενα προσομοιώματα δεν είναι δυνατόν να λάβουν υπόψη την επίδραση της σειράς με την οποία τοποθετούνται οι στρώσεις του κάθε υφάσματος, για δεδομένο αριθμό στρώσεων από το κάθε είδος. Επιπλέον, στα διαγράμματα με τις πολλές τιμές και τα πολλά σημεία δε θα ήταν εύκολο να απεικονισθεί το τι ακριβώς διαφοροποιεί π.χ. το δοκίμιο GCC από το CCG. Για το λόγο αυτό, κατασκευάζεται ο παρακάτω πίνακας, με τους λόγους $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ για εκείνα τα μοντέλα που κρίθηκαν πιο αξιόπιστα.

Πίνακας 3.2.4: Τιμές λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen για καθένα εκ των 5 επιλεγόμενων ως αξιόπιστων προσομοιωμάτων [7].

Δοκίμιο	Λόγος $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$				
	Karbhari – Gao II	Samaan et al	Spoelstra - Monti	Saafi et al	Lin - Chen
C/C/G	1.24	1.29	1.26	1.28	1.21
C/C/G	1.26	1.31	1.27	1.29	1.23
C/C/G	1.24	1.30	1.26	1.28	1.22
C/G/C	1.36	1.42	1.38	1.40	1.33
C/G/C	1.05	1.10	1.07	1.09	1.03
C/G/C	1.28	1.34	1.30	1.32	1.26
G/C/C	1.02	1.07	1.04	1.05	1.00
G/C/C	0.97	1.02	0.99	1.00	0.95
G/C/C	1.07	1.12	1.09	1.10	1.05
C/G/G	1.04	1.06	1.02	1.07	1.03
C/G/G	0.99	1.01	0.97	1.01	0.98
C/G/G	1.01	1.03	0.99	1.04	1.00
G/C/G	1.01	1.03	0.99	1.03	1.00
G/C/G	0.99	1.01	0.97	1.01	0.98
G/C/G	0.99	1.02	0.98	1.02	0.99
G/G/C	0.94	0.96	0.93	0.97	0.94
G/G/C	0.94	0.96	0.93	0.97	0.94
G/G/C	1.00	1.02	0.98	1.03	0.99

Η μελέτη του πίνακα αυτού οδηγεί στο συμπέρασμα ότι:

- για τοποθέτηση μίας στρώσης G και δύο στρώσεων C, εκείνη η διάταξη μανδύα που παρέχει την μεγαλύτερη συμφωνία πειραματικών αποτελεσμάτων – προβλέψεων προσομοιωμάτων είναι η G/C/C, δηλαδή εκείνη στην οποία η στρώση γυαλιού είναι εσωτερική.

- για τοποθέτηση μίας στρώσης C και δύο στρώσεων G, δεν υπάρχει κάποια τάση που να υποδεικνύει ποια διάταξη παρέχει τη μεγαλύτερη συμφωνία συμφωνία πειραματικών αποτελεσμάτων – προβλέψεων προσομοιωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αυτής της εργασίας προτείνεται μια σειρά πειραμάτων με σκοπό την διερεύνηση της επιρροής στην περίσφιγξη της ταυτόχρονης εφαρμογής δύο διαφορετικών ινοπλισμένων υλικών σε κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά περίσφιγξης των συγκεκριμένων ενισχυμένων δοκιμίων με βάση τα αναλυτικά προσομοιώματα, με στόχο να συγκριθούν με τις πειραματικές τους τιμές σε μελλοντική εκτέλεση των πειραμάτων στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα δοκίμια των οποίων τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά υπολογίζονται σε αυτό το κεφάλαιο έχουν ήδη κατασκευαστεί, και στη συνέχεια θα δοθεί φωτογραφικό υλικό από τη διαδικασία παρασκευής τους.

Η διερεύνηση της συνδυασμένης χρήσης υφάσματος CFRP και GFRP με σκοπό την βελτίωση της αντοχής αλλά και της ποιότητας της αστοχίας δημιουργώντας μια κατά το δυνατόν τριαξονική εντατική κατάσταση περίσφιγξης γίνεται σε πρώτη φάση μέσω της πρόβλεψης των χαρακτηριστικών των περισφιγμένων με αυτόν τον σύνθετο μανδύα δοκιμίων, και σε δεύτερη φάση προβλέπεται η ταυτοποίησή της μέσω πειραμάτων. Μεταξύ των υφασμάτων FRP από ίνες άνθρακα και υάλου, οι πρώτες χαρακτηρίζονται από υψηλές αντοχές και για τις δεύτερες έχει αποδειχθεί ότι ενδεχομένως να προσδίδουν πλαστιμότητα και λιγότερο καταστροφική αστοχία σε συνδυασμό με αυτές του άνθρακα. Τα υφάσματα με ίνες το υάλου έχουν μέτρο ελαστικότητας κοντά στο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος που τα καθιστά πολύ πιο συμβατά με το σκυρόδεμα συγκριτικά με άλλα υλικά ενίσχυσης ενώ δε δοκιμές των GFRP υπό συνθήκες κόπωσης απέδειξαν πως συμπεριφέρονται 20 φορές καλύτερα από το συμβατικό χάλυβα υπό τις ίδιες συνθήκες.

4.2 Είδη δοκιμίων

Τα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι κύλινδροι, αφού με βάσει κυλινδρικά δοκίμια έχουν εξαχθεί τα προσομοιώματα. Επιλέχθηκε διάσταση κυλίνδρων 150 x 300mm κατά τις προδιαγραφές δοκιμίων ASTM και επιλέγοντας αναλογία ύψους προς διάμετρο ίση με 2. Προτείνεται η ενίσχυση με 16 διαφορετικούς μανδύες και η παρασκευή δύο δοκιμίων για την κάθε περίπτωση διάταξης μανδύας. Μαζί και με το απερίσφιγκτο δοκίμιο ελέγχου, ο συνολικός αριθμός δοκιμίων του πειραματικού προγράμματος είναι 34. Οι διατάξεις μανδύα που θα χρησιμοποιηθούν είναι:

1. Μία στρώση υφάσματος GFRP (κωδικός δοκιμίου G)
2. Μία στρώση υφάσματος CFRP (κωδικός δοκιμίου C)
3. Δύο στρώσεις υφάσματος GFRP (κωδικός δοκιμίου GG)
4. Δύο στρώσεις υφάσματος CFRP (κωδικός δοκιμίου CC)
5. Τρεις στρώσεις υφάσματος GFRP (κωδικός δοκιμίου GGG)
6. Τρεις στρώσεις υφάσματος CFRP (κωδικός δοκιμίου CCC)
7. Μία στρώση υφάσματος GFRP και μία στρώση υφάσματος CFRP (κωδικοί δοκιμίων GC και CG).
8. Μία στρώση υφάσματος GFRP και δύο στρώσεις υφάσματος CFRP (κωδικοί δοκιμίων GCC και CGC και CCG).
9. Μία στρώση υφάσματος CFRP και δύο στρώσεις υφάσματος GFRP (κωδικοί δοκιμίων CGG και GCG και GGC).
10. Δύο στρώσεις υφάσματος CFRP και τρεις στρώσεις υφάσματος GFRP (κωδικός δοκιμίου GCGCG).
11. Τρεις στρώσεις υφάσματος CFRP και δύο στρώσεις υφάσματος GFRP (κωδικός δοκιμίου CGCGC).

4.3 Υλικά

Ακολουθεί ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή του σκυροδέματος παρασκευής των κυλίνδρων και του συστήματος όπλισής τους με υφάσματα σύνθετων υλικών.

4.3.1 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων ήταν κατηγορίας C20/25. Έχει συνεπώς χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κυλίνδρου 20 MPa και μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζεται μέσω της σχέσης του ΕΚΩΣ:

$$E_c = 9500(f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (4.3.1)$$

$$\text{άρα } E_c = 9500(20 + 8)^{1/3} = 28.85 \text{ GPa}$$

Αδρανή

Το εργαστήριο διαθέτει αδρανή με δύο κοκκομετρικές διαβαθμίσεις με διαφορά ως προς τον μέγιστο κόκκο. Για τη μεν πρώτη ο μέγιστος κόκκος αδρανούς είναι 5mm και για την δεύτερη 15mm.

Στην διπλωματική εργασία του Α. Κάνου «Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος» [18] που εκπονήθηκε το 2004, έγιναν πειράματα και έχουν εξαχθεί καμπύλες που δίνουν την αντοχή των κυλίνδρων συναρτήσει της διαμέτρου τους, για δύο κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και για διάφορα μεγέθη κυλίνδρων.

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις διέφεραν ως προς τον μέγιστο κόκκο αδρανούς και συγκεκριμένα:

- η πρώτη (α') είχε μέγιστο κόκκο 15 mm
- η δεύτερη (β') είχε μέγιστο κόκκο 5 mm

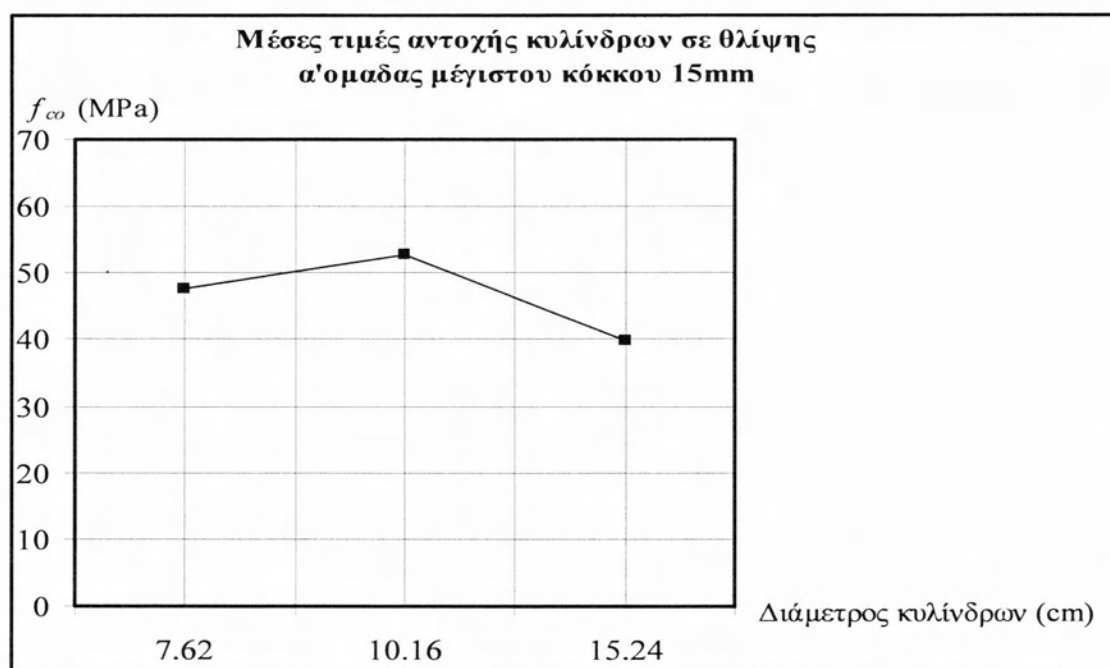
και είχαν σκυροδέτηθει αντίστοιχα δύο ομάδες δοκιμίων. Λόγω διαφοράς στην ημερομηνία δοκιμής των κυλίνδρων της πρώτης σειράς και άρα διαφοράς στην αντοχή σε θλίψη, η οποία έφτανε πάνω από 30%, χωρίστηκε σε δύο ομάδες. Στα παρακάτω διαγράμματα και τους πίνακες παρουσιάζονται οι μέσες τιμές αντοχής των κυλίνδρων σε θλίψη.

Πίνακας 4.3.1: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη κυλίνδρων α' ομάδας
α' κοκκομετρικής διαβάθμισης δοκιμίων σε θλίψη [18]

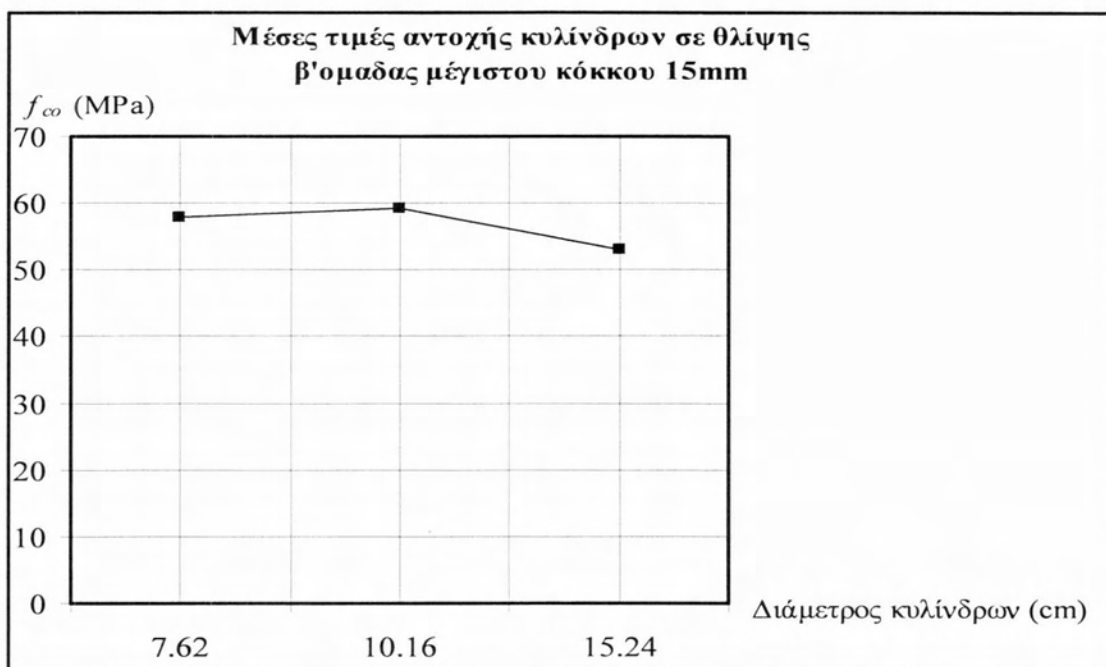
Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{max}=15\text{ mm}$	
Διάμετρος κυλίνδρου D(cm)	Θλιπτική Αντοχή f_{co} (MPa) Πειραματικά δεδομένα (μέσες τιμές)
7.62	47.76
10.16	52.78
15.24	39.84

Πίνακας 4.3.2: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη κυλίνδρων β' ομάδας
α' κοκκομετρικής διαβάθμισης [18]

Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{max}=15\text{ mm}$	
Διάμετρος κυλίνδρου D(cm)	Θλιπτική Αντοχή f_{co} (MPa) Πειραματικά δεδομένα (μέσες τιμές)
7.62	57.91
10.16	59.14
15.24	52.91



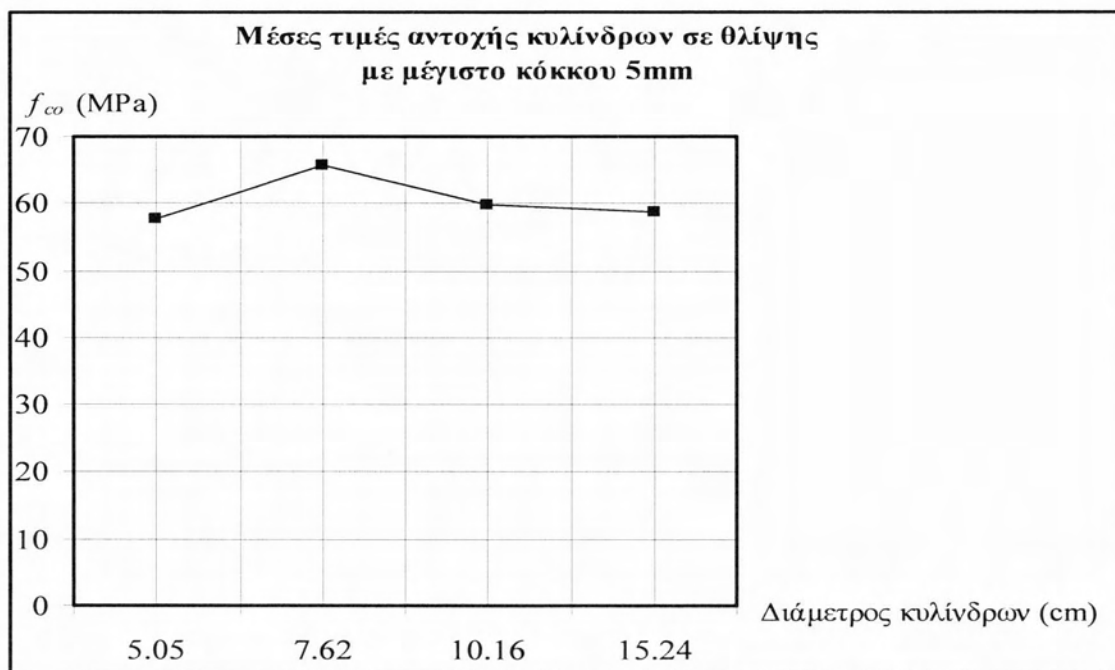
Σχήμα 4.3.1: Σχηματική αναπαράσταση αντοχής κυλίνδρων α' ομάδας
α' κοκκομετρικής διαβάθμισης [18]



Σχήμα 4.3.2: Σχηματική αναπαράσταση αντοχής κυλίνδρων β'ομάδας α' κοκκομετρικής διαβάθμισης [18]

Πίνακας 4.3.3: Αποτελέσματα αντοχής κυλίνδρων σε θλίψη β' κοκκομετρικής διαβάθμισης [21]

Μέγιστο μέγεθος κόκκου $d_{max} = 5 \text{ mm}$	
Διάμετρος κυλίνδρου D(cm)	Θλιπτική Αντοχή f_{co} (MPa) Πειραματικά δεδομένα (μέσες τιμές)
5.05	57.58
7.62	65.646
10.16	59.756
15.24	58.642



Σχήμα 4.3.3: Σχηματική αναπαράσταση αντοχής κυλίνδρων β' κοκκομετρικής διαβάθμισης δοκιμίων [18]

Τα δοκίμια που μας ενδιαφέρουν είναι αυτά με $D=15.25\text{cm}$. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα βλέπουμε πως για τα δοκίμια με μέγιστο κόκκο αδρανών 15mm, η θλιπτική αντοχή αφενός επηρεάζεται άμεσα από αλλαγές στις διαστάσεις των δοκιμίων, αφετέρου είναι σημαντικά μικρότερη από τα αντίστοιχα δοκίμια με μέγιστο κόκκο αδρανών 5mm. Οι διαφορές που σημειώνονται είναι αναμενόμενες λόγω των φαινομένων κλίμακας. Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερο κόκκο αδρανών έχουμε, που σημαίνει ίσως μεγαλύτερα κενά στην μάζα του κυλίνδρου, τόσο πιο σημαντική είναι η αύξηση της αντοχής των μικρότερων δοκιμίων λόγω των φαινομένων κλίμακας. Αντίθετα τα ίδια δοκίμια με κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών μικρότερου μέγιστου κόκκου παρουσιάζουν μικρή ποσοστιαία αύξηση της αντοχής. Για τους λόγους αυτούς προτείνεται να χρησιμοποιηθεί κοκκομετρική διαβάθμιση ανάλογη με αυτήν με μέγιστο κόκκο 5mm. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η συγκεκριμένη κοκκομετρική διαβάθμιση.

Πίνακας 4.3.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών σκυροδέματος

Κοκκομετρική Καμπύλη 1/5"			
Κόσκινα	% Διερχόμενα	% Συγκρατούμενα	Βάρος (Kg)
1/2	100	0	0
3/8	100	0	0
4	100	0	0
8	75	25	29.25
16	53	22	25.74
30	34	19	22.23
50	16	18	21.06
80	8	8	9.36
100	4	4	4.68
200	1	3	3.51
Παιπάλη		1	1.17
Συνολικό Βάρος		100	117

Αναλογίες μίγματος

Προτείνεται να χρησιμοποιηθούν για το μίγμα του τσιμεντοπολτού αναλογίες παρόμοιες με αυτές που είχαν χρησιμοποιηθεί στη εργασία του Α. Κάνου και οι οποίες ήταν **1 : 2 : 1 : 0.4** (Τσιμέντο : Αδρανή : Άμμο : Νερό) με τσιμέντο τύπου Portland. Ο ελάχιστος για την ενυδάτωση λόγος N / T είναι περίπου 0.42. Στην περίπτωση, όμως, υγρής συντήρησης η πλήρης ενυδάτωση επιτυγχάνεται για αρχικό λόγο N / T ίσο με 0.36. Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι ο ελάχιστος λόγος N/T πρέπει να είναι 0.36-0.42.

4.3.2 Υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών [19]

Υφασμα ινών άνθρακα

Το ύφασμα ινών άνθρακα με το οποίο περιερίχθηκαν τα δοκίμια είναι το Sika Wrap 230 C/45 της εταιρείας Sika, μιας κατεύθυνσης ινών για ξηρή μέθοδο εφαρμογής. Αποτελείται από ίνες άνθρακα μέσης αντοχής, με διεύθυνση ινών 0°, το υφάδι αποτελείται από μαύρες ίνες άνθρακα που αποτελούν το 99% του συνολικού βάρους του υφάσματος και το στημόνι αποτελείται από λευκές θερμοπλαστικές ίνες θερμικά σχηματιζόμενες που αποτελούν το 1% του συνολικού βάρους. Τα τεχνικά, φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υφάσματος δίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.3.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 230 C/45

Βάρος Υφάσματος g/m²	Σχεδιαστικό πάχος υφάσματος (mm)	Πυκνότητα ινών g/cm³
230 ± 10	0.131	1.76

Πίνακας 4.3.6: Μηχανικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 230 C/45
(ονομαστικές τιμές)

Εφελκυστική αντοχή f_t (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας E_f (GPa)	Οριακή παραμόρφωση ε_{f,u} (%)
4300	234	18

Υφασμα ινών υάλου

Το ύφασμα ινών υάλου με το οποίο περιερίχθηκαν τα δοκίμια είναι το Sika Wrap 430 G/25 της εταιρείας Sika, μιας κατεύθυνσης ινών για ξηρή μέθοδο εφαρμογής. Αποτελείται από ίνες υάλου με διεύθυνση ινών 0°, το υφάδι αποτελείται από λευκές ίνες υάλου που αποτελούν το 99% του συνολικού βάρους του υφάσματος και το στημόνι αποτελείται από λευκές θερμοπλαστικές ίνες θερμικά σχηματιζόμενες

που αποτελούν το 1% του συνολικού βάρους. Τα τεχνικά, φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υφάσματος δίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.3.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 430 G/25

Βάρος Υφάσματος g/m^2	Σχεδιαστικό πάχος υφάσματος (mm)	Πυκνότητα ινών g/cm^3
445 \pm 22	0.172	2.56

Πίνακας 4.3.8: Μηχανικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 430 G/25
(ονομαστικές τιμές)

Εφελκυστική αντοχή f_f (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας E_f (GPa)	Οριακή παραμόρφωση $\epsilon_{f,u}$ (%)
3400 (μέτρηση νήματος)	76	28
2300 (μέτρηση πλέξης νημάτων)		

Κόλλα

Η κόλλα με την οποία εφαρμόστηκαν τα σύνθετα υλικά πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος (σκυρόδεμα κυλίνδρων) είναι η Sikadur – 330 της εταιρείας Sika. Πρόκειται για μία θιξοτροπική εποξειδική ρητίνη εμποτισμού / συγκόλλησης δύο συστατικών, χωρίς διαλύτες. Χρησιμοποιείται με τα υφάσματα δομητικών ενισχύσεων SikaWrap με την ξηρή μέθοδο εφαρμογής.

Πίνακας 4.3.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά κόλλας Sikadur – 330

Θερμοκρασία λειτουργίας	Συντελεστής Θερμικής Διαστολής	Πυκνότητα kg/l
-40°C έως +45°C	4.5 x 10 ⁻⁵ /°C (-10°C έως +40°C)	1.3 \pm 0.1

Πίνακας 4.3.10: Μηχανικά χαρακτηριστικά κόλλας Sikadur – 330

Εφελκυστική αντοχή f_f (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας E_f (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης $\varepsilon_{f,u}$ (%)
30 (7 ημέρες στους 23°C)	3.8 (καμπτικό) 4.5 (εφελκυστικό)	0.9

4.4 Περιγραφή προετοιμασίας δοκιμών

Η οργάνωσης της προετοιμασίας και της εκτέλεσης ενός πειράματος είναι μια απαιτητική εργασία που πρέπει να γίνει με επιμέλεια έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη και να αντιμετωπιστούν όλοι οι παράγοντες που μπορούν να εισαγάγουν σφάλματα. Παρακάτω συνοψίζονται τα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν [20]:

1. Στήσιμο της πειραματικής διάταξης και των συσκευών μετρήσεων

- Προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμών για σωστή τοποθέτηση των συσκευών μέτρησης.
- Απόδοση των διαφόρων συσκευών μέτρησης (μετρητές φορτίσεων, παραμορφώσεων).
- Ευθυγράμμιση ινών - συσκευών μέτρησης.

2. Επίδραση φόρτισης

- Τιμές τάσεων παραμορφώσεων αστοχίας.
- Διάρκεια πειράματος και επιμέρους φάσεων του πειράματος.
- Τρόποι αστοχίας.
- Γενική συμπεριφορά του δοκιμίου στην φόρτιση – παραμόρφωση.
- Κατηγοριοποίηση του σχήματος της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων.

3. Τοπικά φαινόμενα

- Διερεύνηση του απαιτούμενου μήκος υπερκάλυψης (αγκύρωσης).

- Ανάπτυξη διατμητικής δύναμης μεταξύ διαφορετικών ειδών υφάσματος.
- Εξέταση της εικόνας του δοκιμίου μετά την αστοχία.
- Λυγισμός, θραύση ή αποδιοργάνωση των ινών.
- Ρόλος των διαμήκων, εγκάρσιων, και υπό γωνία ινών.
- Τοπικές συνθήκες των περισφιγμένων και απερίσφιγκτων άκρων.
- Διερεύνηση του μηχανισμού συγκόλλησης της διεπιφάνειας σκυροδέματος – FRP.

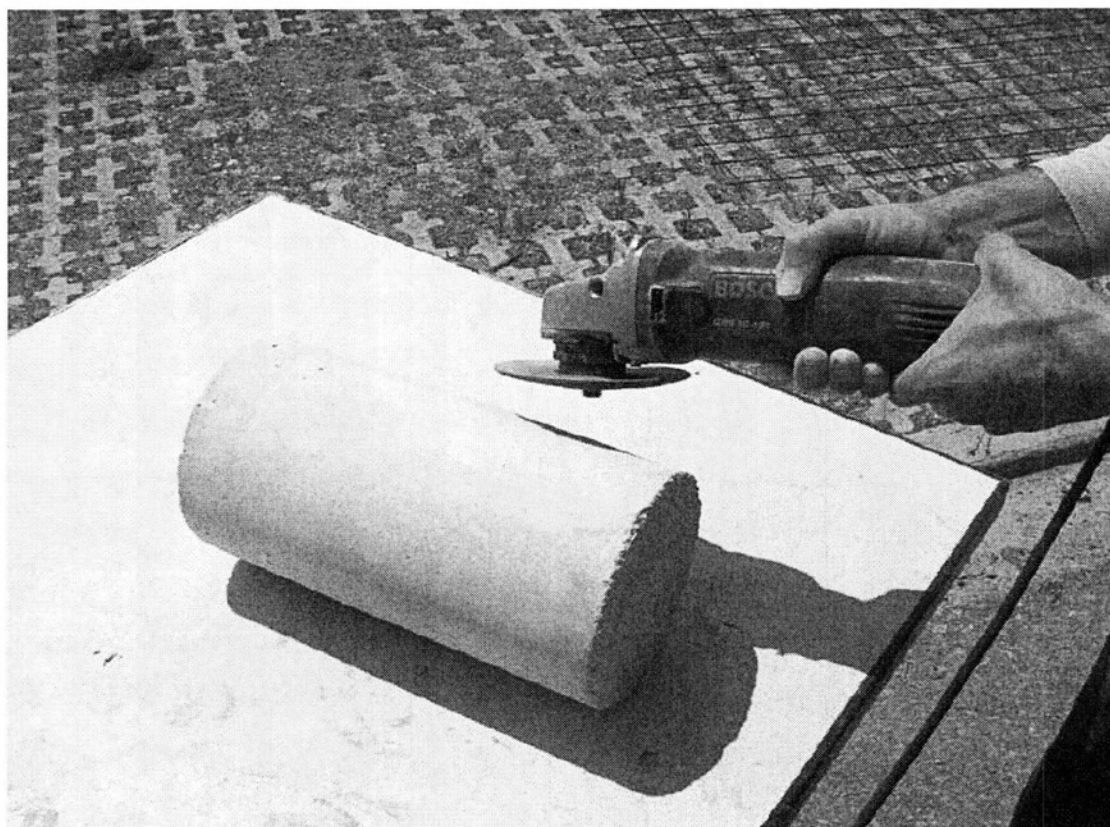
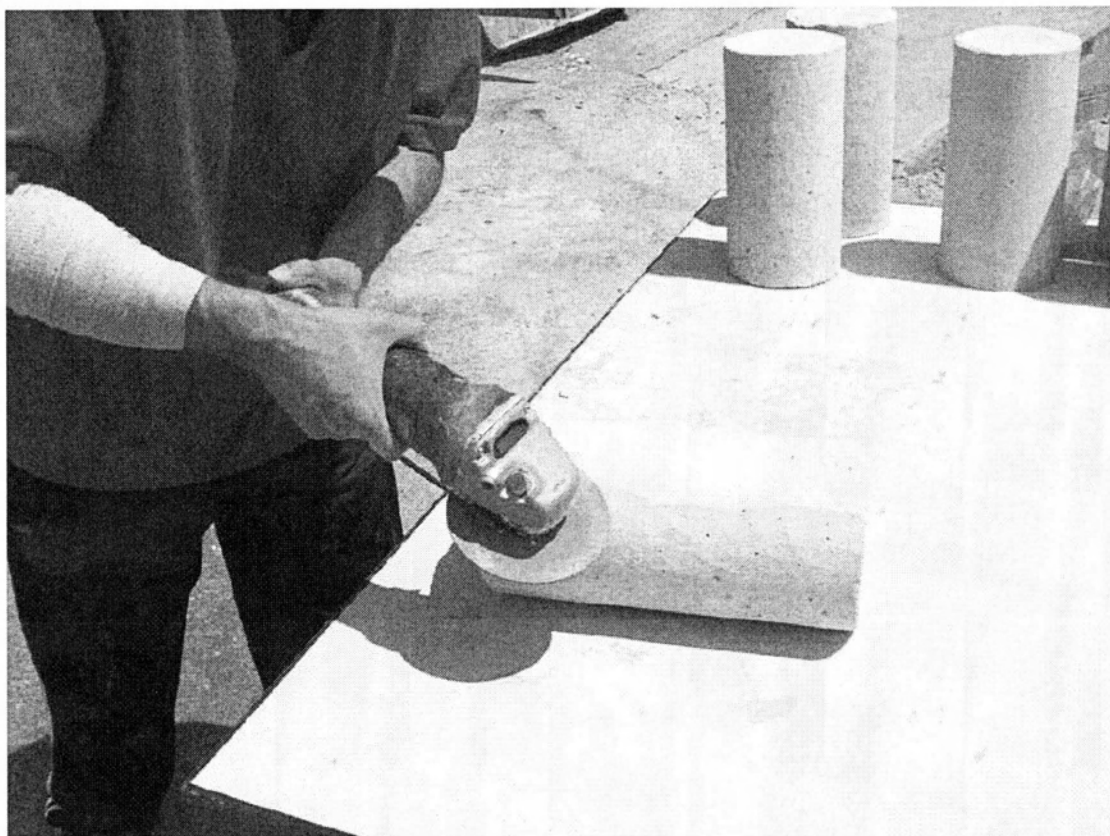
4. Τεχνικά – παρασκευαστικά φαινόμενα

- Ατέλειες και θύλακες αέρα.
- Κακή υπερκάλυψη - αγκύρωση.
- Πάχος και ποιότητα ρητίνης.
- Συσσώρευση στρώσεων υφάσματος.
-

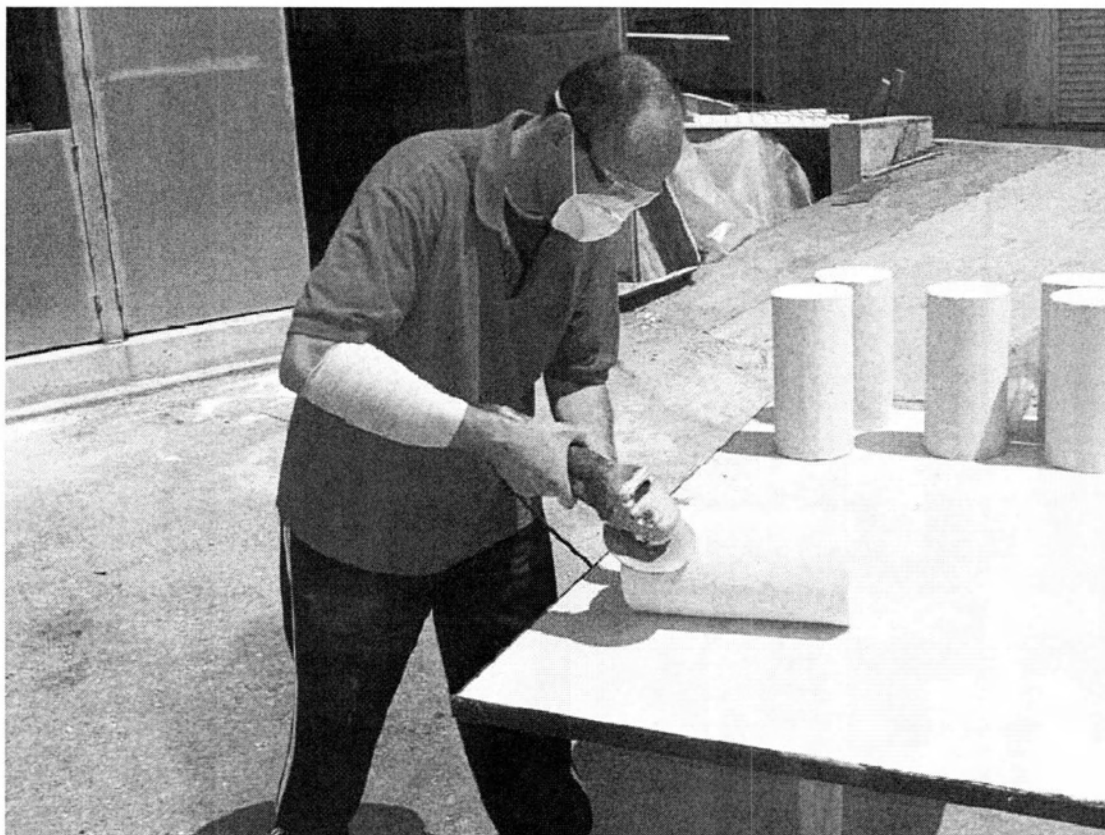
Όσον αφορά στην τοποθέτηση των στρώσεων των υφασμάτων, έχει γίνει η πλήρης περιγραφή των μανδυνών στην § 4.2.

Όσον αφορά στην κλίση και τον προσανατολισμό των ινών, αν και η σχετική βιβλιογραφία ενθαρρύνει την διαφοροποίηση της γωνίας προσανατολισμού των FRP με στόχο την βελτίωση της ποιότητας της αστοχίας, στην παρούσα εργασία θα τοποθετηθούν ίνες με προσανατολισμό κατά την εγκάρσια διεύθυνση που είναι και η ενδεικνυόμενη για απολαβή της μέγιστης αντοχής.

Μετά την σκυροδέτηση των κυλίνδρων και την συντήρησή τους μέχρι να φτάσει το σκυρόδεμα στην κατάλληλη αντοχή του, εκτραχύνθηκε η επιφάνεια τους με ήπια εφαρμογή φρεζαρίσματος ώστε να απομακρυνθεί η τσιμεντοεπιδερμίδα και να δημιουργηθούν ευνοϊκές συνθήκες για την καλύτερη δυνατή εφαρμογή της εποξειδικής ρητίνης. Ακολούθως έγινε καθαρισμός και πλύση των κυλίνδρων με χρήση πεπιεσμένου νερού, σε συνδυασμό με βούρτσισμα για την απομάκρυνση πιθανών ρύπων όπως λιπαρές ουσίες, σκόνες κτλ. Η διαδικασία αυτή αναπαριστάται στις παρακάτω εικόνες.



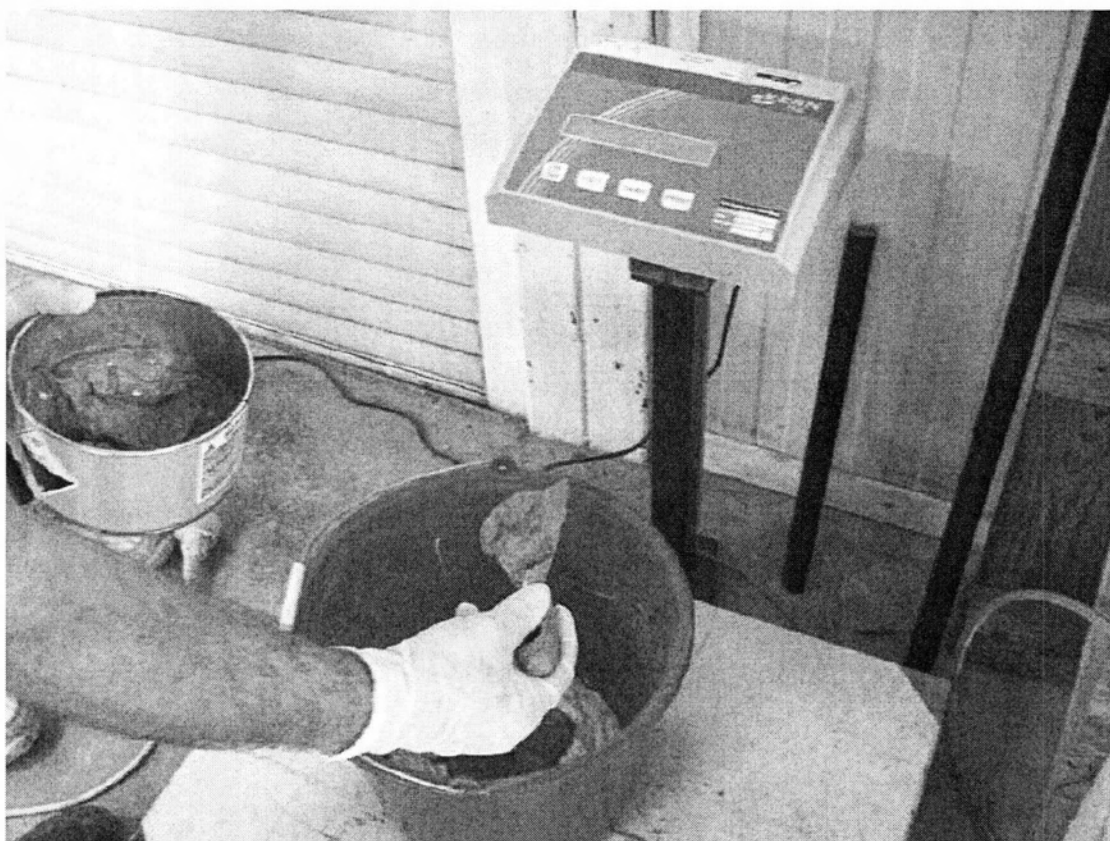
Εικόνες 4.4.1: Κοντινά στιγμιότυπα της μηχανικής εκτράχυνσης της επιφάνειας των δοκιμίων.



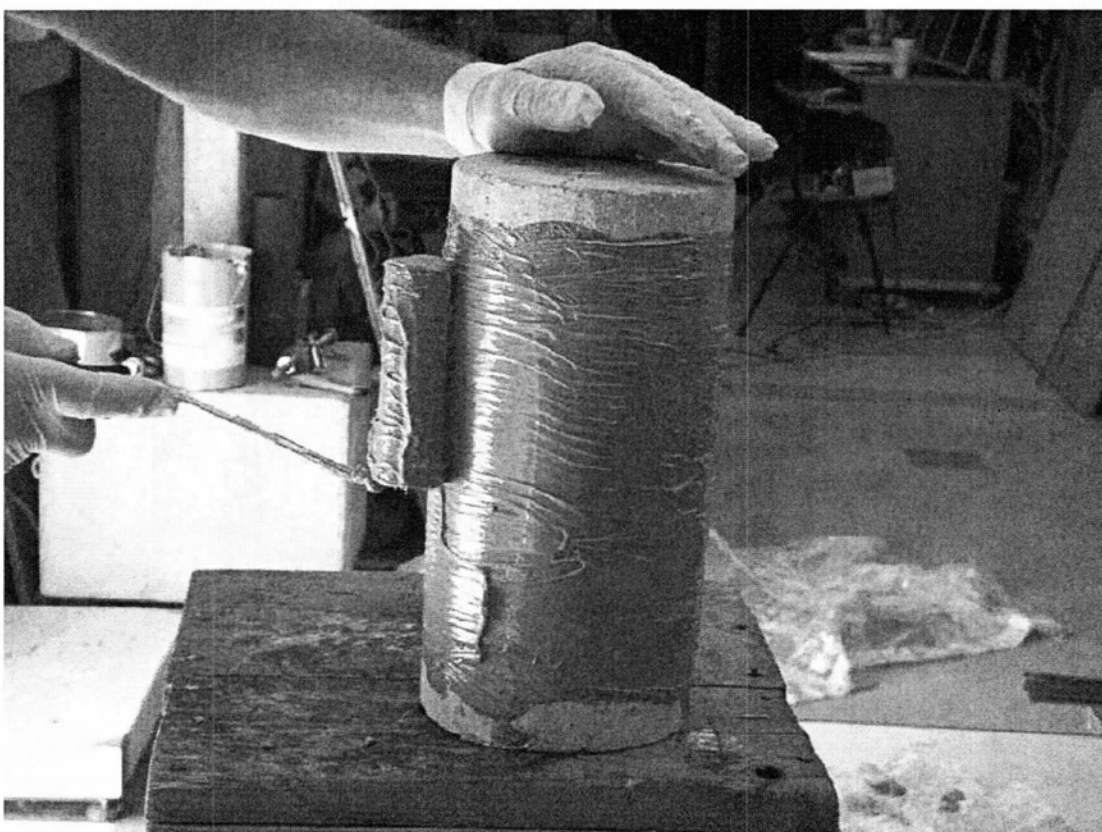
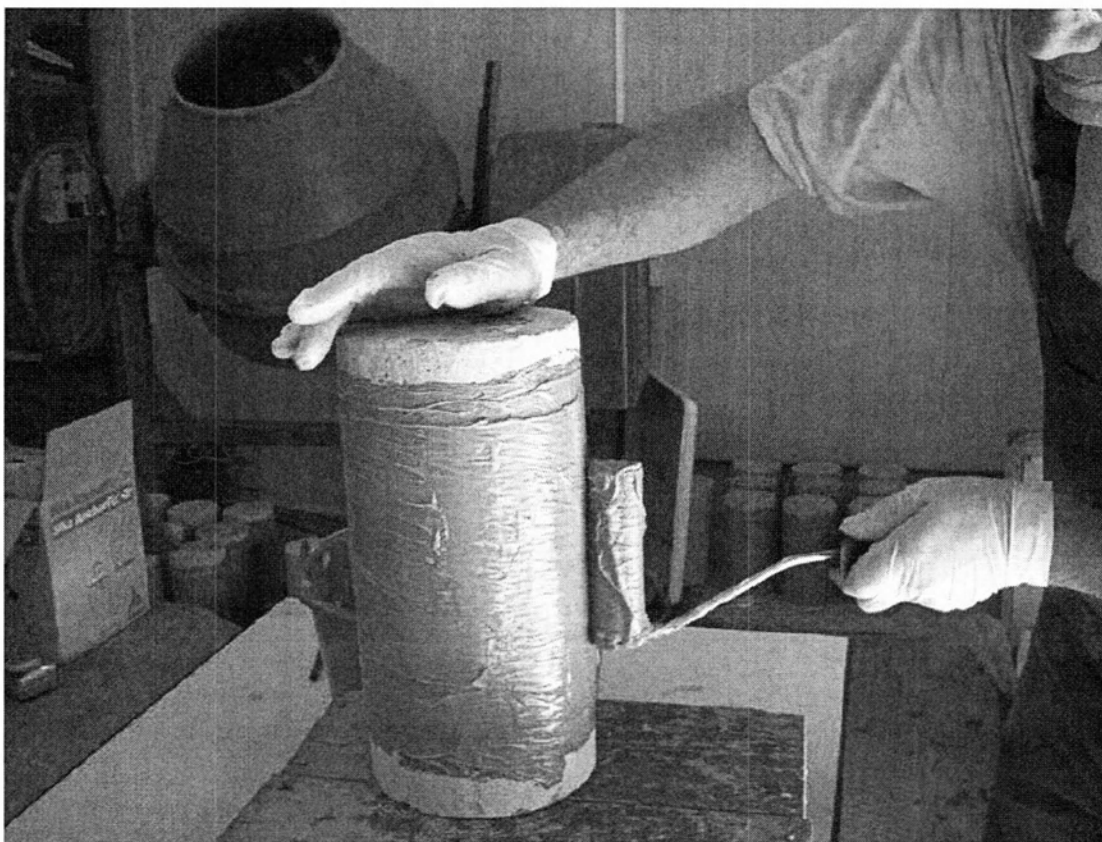
Εικόνες 4.4.2: Παρασκευαστής με προστατευτικά γυαλιά και μάσκα κατά τη διαδικασία εκτράχυνσης της επιφάνειας των δοκιμίων.

Πριν την εφαρμογή των υφασμάτων περίσφιγξης ένα ζήτημα που έπρεπε να διερευνηθεί ήταν ο καθορισμός του μήκους αγκύρωσης (overlapping length) των στρώσεων FRP, ώστε να αποδώσει το σύστημα την μέγιστη δυνατή περίσφιγξη χωρίς τον κίνδυνο εμφάνισης φαινομένων αστοχίας – αποκόλλησης λόγω ελλιπούς αγκύρωσης. Αποφασίστηκε να τοποθετηθεί μήκος αγκύρωσης σε κάθε στρώση ίσο με 10 cm.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών, αφού πρώτα τοποθετήθηκε η στρώση κόλλας στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι εκτός από την αρχική στρώση κόλλας πριν την εφαρμογή του μανδύα των σύνθετων υλικών, τοποθετήθηκε και μια τελική μετά την περιέλιξη του μανδύα. Η διαδικασία εφαρμογής της κόλλας και η τελική μορφή και σήμανση των δοκιμίων φαίνεται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνες 4.4.3: Διαδικασία παρασκευής κόλλας μέσω ανάμειξης των δύο συστατικών.



Εικόνες 4.4.4: Διαδικασία εφαρμογής κόλλας στην επιφάνεια των δοκιμίων.



Εικόνες 4.4.5: Ταξινόμηση, σήμανση και φύλαξη των δοκιμίων.

4.5 Προβλέψεις αντοχών και παραμορφώσεων θραύσης του πειραματικού προγράμματος

Στην παράγραφο αυτή εφαρμόζονται τα αναλυτικά προσομοιώματα πρόβλεψης των χαρακτηριστικών του περισφιγμένου σκυροδέματος που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο ως τα πιο ακριβή σε σχέση με τα πειράματα των Lin and Chen [7]. Τα προσομοιώματα αυτά είναι των Karbhari – Gao II, Samaan et al, Spoelstra – Monti, Saafi, Lin - Chen. Η εφαρμογή των μοντέλων αυτών γίνεται με σκοπό να δοθεί μια αρχική εκτίμηση των τιμών αντοχής και παραμόρφωσης αστοχίας που αναμένεται να προκύψουν κατά την μελλοντική εκτέλεση του πειράματος.

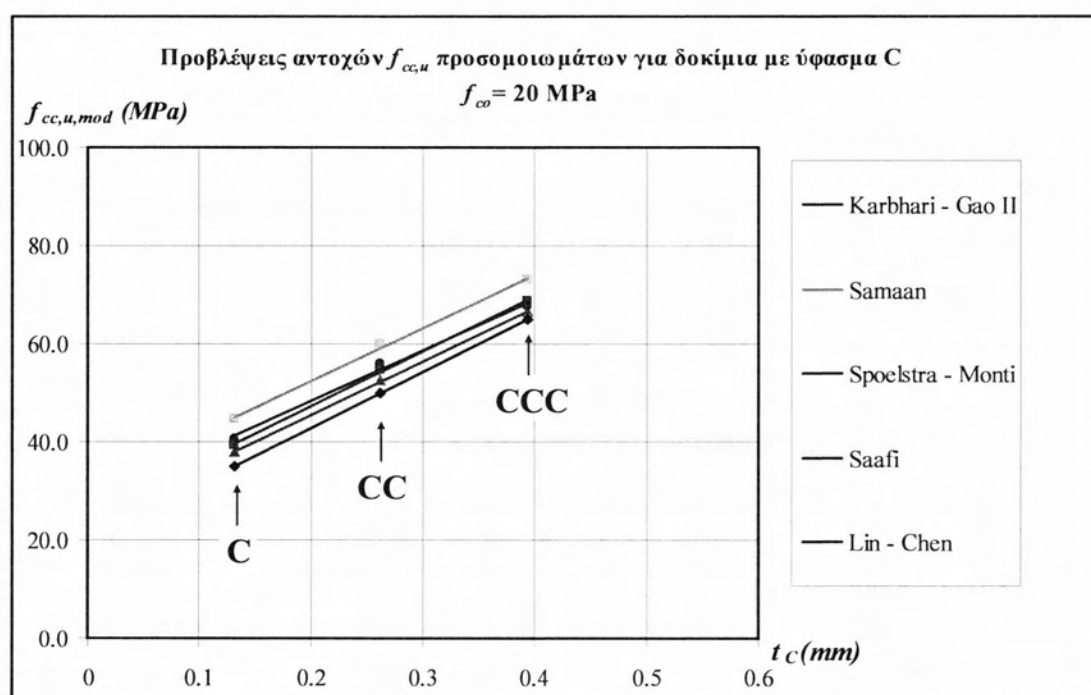
Οι αναλυτικοί πίνακες υπολογισμού δίνονται στο Παράρτημα Β. Στον Πίνακα 4.5.1 που φαίνεται κατωτέρω συνοψίζονται τα αποτελέσματα για την τελική θλιπτική αντοχή και την παραμόρφωση αστοχίας για καθεμία από τις 11 συνθέσεις μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών. Τα Σχήματα που ακολουθούν απεικονίζουν τα αποτελέσματα αυτά υπό τη μορφή διαγραμμάτων για λόγους σύγκρισης.

Πίνακας 4.5.1: Προβλεπόμενες τιμές αντοχής για κάθε διάταξη μανδύα, με βάση τα αναλυτικά προσομοιώματα.

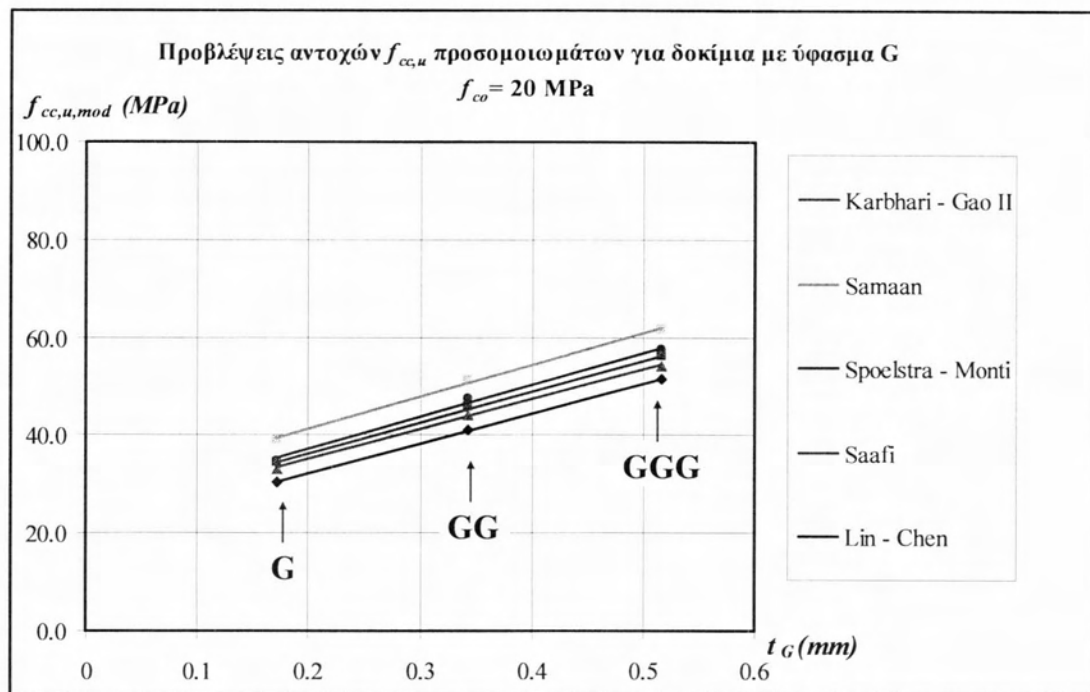
Δοκίμιο	$f_{cc,u, mod} (MPa)$				
	Karbhari - Gao II	Samaan et al	Spoelstra - Monti	Saafi et al	Lin - Chen
G	33.17	39.22	34.81	34.36	30.55
C	37.91	44.61	40.77	39.33	35.02
G/G	44.07	51.22	47.58	45.71	41.10
C/C	52.74	59.98	56.00	54.60	50.04
G/G/G	54.26	61.46	57.37	56.14	51.65
C/C/C	66.59	73.10	67.68	68.63	65.06
G/C - C/G	48.46	55.71	51.97	50.22	45.57
G/C/C-C/G/C-C/C/G	62.54	69.36	64.44	64.55	60.59
C/G/G-G/C/G-G/G/C	58.43	65.48	61.02	60.39	56.12
G/C/G/C/G	81.23	86.16	78.51	83.32	81.69
C/G/C/G/C	85.07	89.48	81.17	87.15	86.16

Πίνακας 4.5.2: Προβλεπόμενες τιμές παραμόρφωσης αστοχίας για κάθε διάταξη μανδύα, με βάση τα αναλυτικά προσομοιώματα.

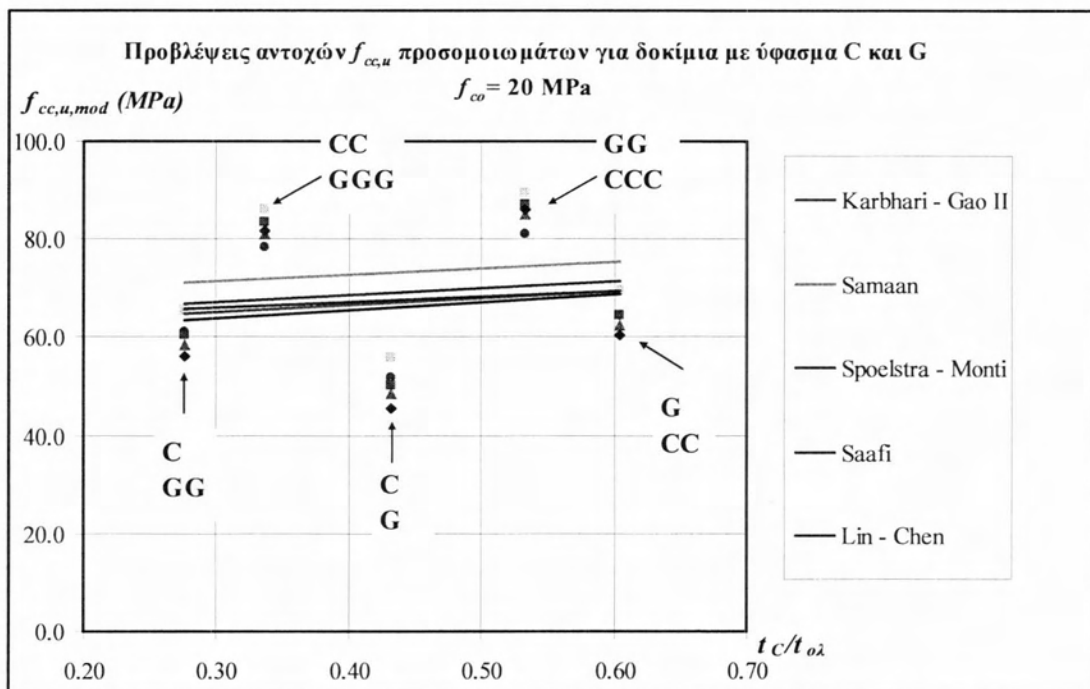
Δοκίμιο	$\varepsilon_{cc,u, mod} (\%)$			
	Karbhari - Gao II	Samaan et al	Spoelstra - Monti	Saafi et al
G	0.46	2.40	6.00	2.91
C	0.58	2.51	7.09	3.84
G/G	0.73	3.46	8.33	5.05
C/C	0.95	3.08	9.86	6.72
G/G/G	0.99	3.99	10.11	7.01
C/C/C	1.33	3.23	11.98	9.37
G/C - C/G	0.84	3.25	9.13	5.90
G/C/C-C/G/C-C/C/G	1.21	3.42	11.39	8.60
C/G/G-G/C/G-G/G/C	1.10	3.67	10.77	7.81
G/C/G/C/G	1.74	3.78	13.95	12.14
C/G/C/G/C	1.85	3.55	14.44	12.86



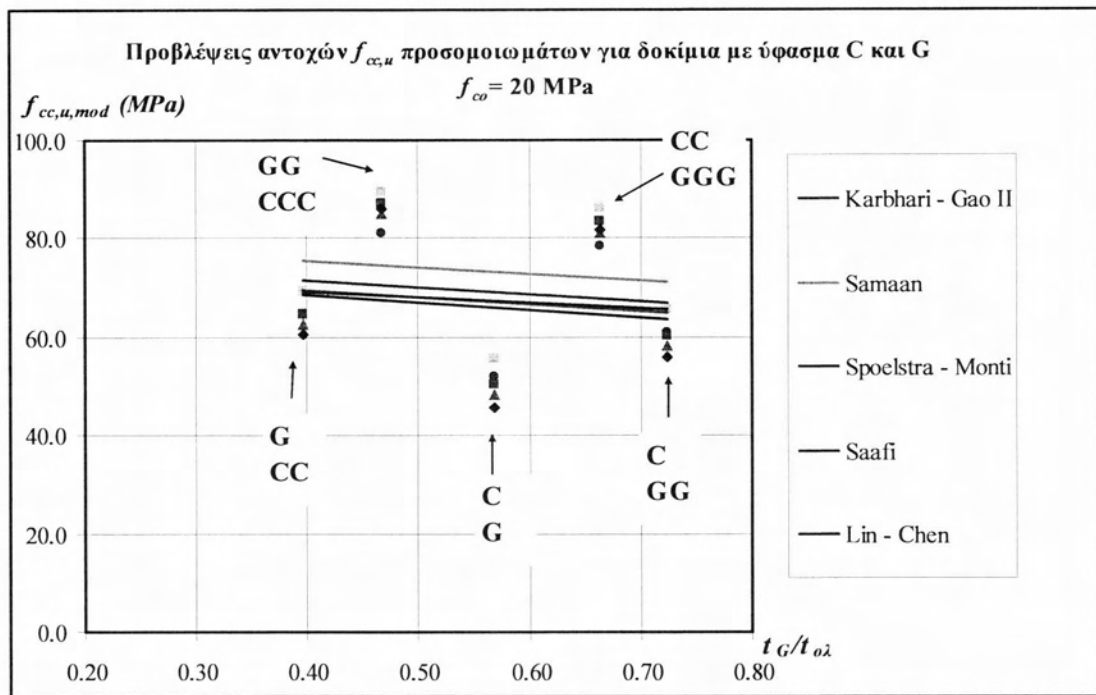
Σχήμα 4.3.4: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος C, συναρτήσεως του πάχους του μανδύα.



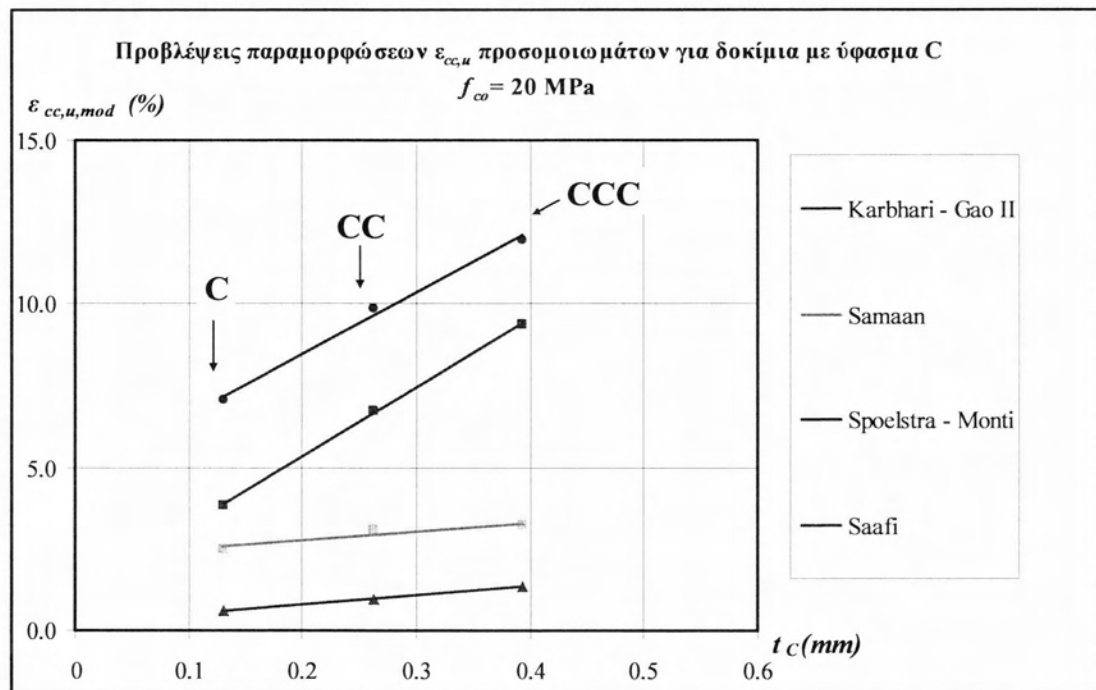
Σχήμα 4.3.5: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος G, συναρτήσει του πάχους του μανδύα.



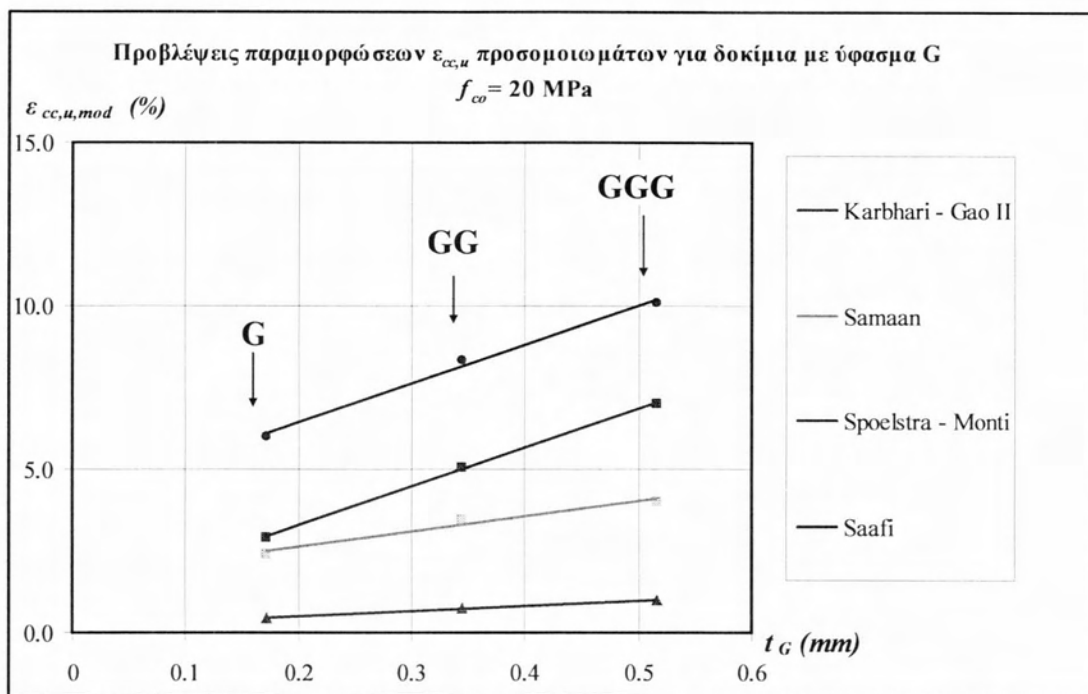
Σχήμα 4.3.6: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.



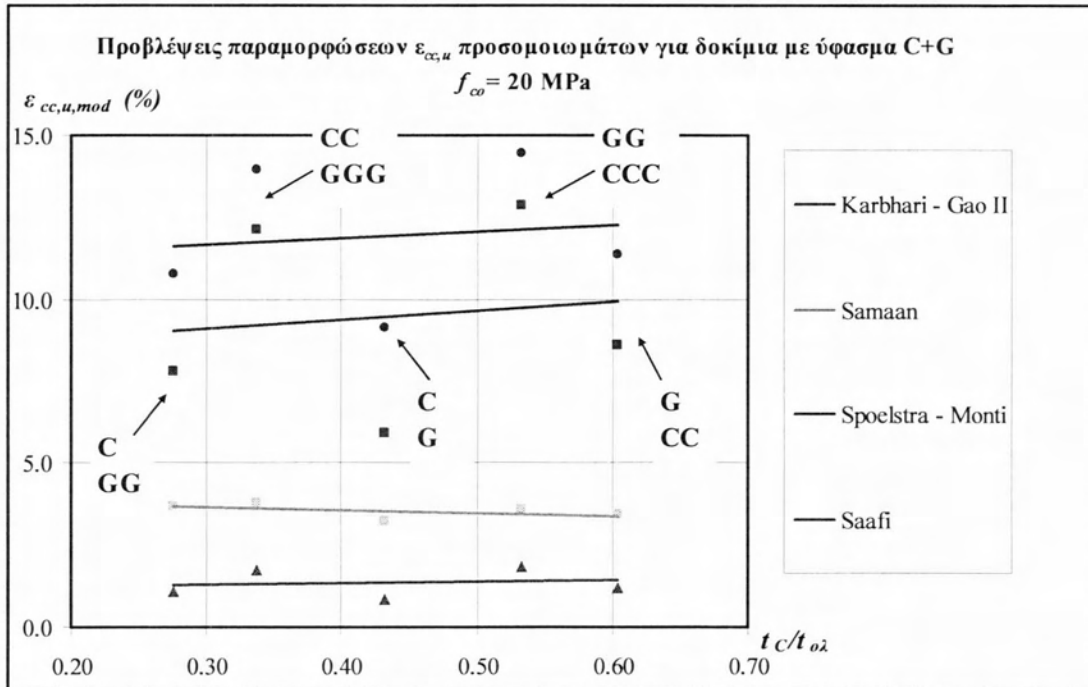
Σχήμα 4.3.7: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συναρτήσεως του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.



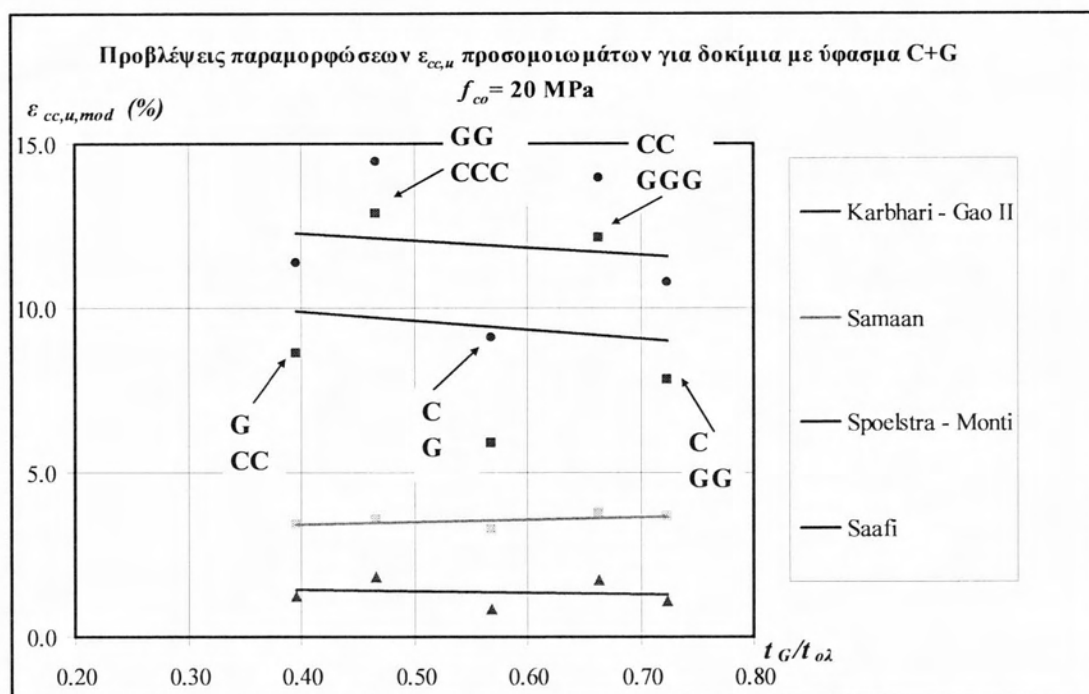
Σχήμα 4.3.8: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος C, συναρτήσεως του πάχους του μανδύα.



Σχήμα 4.3.9: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος G, συνάρτησι του πάχους του μανδύα.



Σχήμα 4.3.10: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συνάρτησι του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.



Σχήμα 4.3.11: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Η παρατήρηση των διαγραμμάτων αυτών οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα χρησιμοποιούμενα προσομοιώματα παρέχουν αρκετά κοντινές τιμές όσον αφορά στην αντοχή των περισφιγμένων κυλίνδρων, για όλες τις περιπτώσεις μανδύα. Ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές παρέχει το προσομοίωμα των Samaan et al.
- Η εφαρμογή των προσομοιωμάτων δείχνει ότι για δεδομένο συνολικό αριθμό στρώσεων (π.χ. 3) η αντοχή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που υπάρχουν 2 στρώσεις C και 1 G παρά όταν υπάρχουν 2 στρώσεις G και 1 C (βλ. Σχήματα 4.3.6 και 4.3.7). Το αποτέλεσμα αυτό δεν συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3, σύμφωνα με τα οποία η ύπαρξη 2 στρώσεων G και 1 C δίνει μεγαλύτερη αντοχή από ότι η ύπαρξη 2 στρώσεις C και 1 G (βλ. Πίνακα 3.2.2 και Σχήμα 3.2.4). Το ζήτημα αυτό επιδέχεται περισσότερης διερεύνησης κατά την μελέτη των αποτελεσμάτων της μελλοντικής εκτέλεσης του παρόντος πειραματικού προγράμματος.

- Τα χρησιμοποιούμενα προσομοιώματα δεν συμφωνούν όσον αφορά στις τιμές της παραμόρφωσης αστοχίας των περισφιγμένων κυλίνδρων. Υπάρχει μεγάλη διασπορά των τιμών, που πιθανόν οφείλεται στην αδυναμία των μοντέλων να λάβουν υπόψη τη διαφορετική παραμόρφωση αστοχίας των ινών του κάθε υφάσματος στο σύνθετο μανδύα. Η διαφορά αυτή μεταξύ των προσομοιωμάτων παρατηρείται και στις περιπτώσεις των μανδύων από ένα μόνο υλικό, είναι όμως μικρότερη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος**, “Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά.”, Πάτρα 2006.
- [2] **Meier U.**, “Strengthening of structures using Carbon Fibre/Epoxy Composites”, *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No 6, pp 341 – 351, 1995.
- [3] **Κωνσταντίνος Σπυράκος**, “Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία” Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2004.
- [4] **Federation International du Beton – fib (2001)**, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, *Bulletin 14*, Lausanne, 2001.
- [5] **Δρίτσος Η. Στέφανος**, “Στρατηγικές και σχεδιασμός αντισεισμικής ενίσχυσης κτιρίων”, Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2007.
- [6] **Spoelstra M.R., Monti G.**, “FRP – confined concrete model”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 3, No 3, pp 143-150, 1999.
- [7] **Lin H-J, Chen C-T**, “Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.20, No 18, pp 1577-1600, 2001.
- [8] **Karbhari V.M., Gao Y.**, “Composite jacketed concrete under uniaxial compression – verification of simple design equations”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp 185 – 193, 1997.
- [9] **Παπαϊωάννου Αγγελική**, “Θεωρητική διερεύνηση εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών στην περίσφιξη κυλίνδρων σκυροδέματος”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος 2011.
- [10] **Fardis M.N., Khalili H.H.**, “FRP-encased concrete as a structural material”, *Mag Concrete Res*, Vol. 34, No 12, pp 191–202, 1982.

- [11] **Miyauchi K., Inoue S., Kuroda T., Kobayashi A.**, “Strengthening effect of concrete columns with carbon fibre sheet”, Transactions of the Japan Concrete Inst, Vol. 21, pp 143–50, 1999.
- [12] **Samaan M., Mirmiran A., Shahawy M.**, “Model of concrete Confined by fiber composites”, J. Struct. Eng., Vol. 124, No 9, pp 1025-1031, 1998.
- [13] **Toutanji H. A.**, “Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets”, ACI Materials Journal, Vol 96, pp 397-404, 1999.
- [14] **Saafi M., Toutanji H.A., Li Z.** “Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced Polymer tubes”, ACI Struct. J., Vol 96, No 4, pp 500–9, 1999.
- [15] **Xiao Y., Wu H.**, “Compressive behaviour of concrete confined by carbon fiber composite jackets”, J Mater Civil Eng, Vol. 12, No 2, pp 139–46, 2000.
- [16] **Wu G., Lü Z., Wu Z.**, “Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites”, Construction and Building Materials, Vol. 20, pp 134-148, 2006.
- [17] **Chaallal O., Shahawy M., Al – Saad PF A.**, “Behaviour of axially loaded short rectangular columns strengthened with CFRP composite wrapping”, Technical Report, FDOT Structures Research Center, 2000.
- [18] **Κάνος Αργύρης**, “Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης κλίμακας στη μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος”. Διπλώματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος 2004.
- [19] **Τεχνικά φυλλάδια εταιρείας Sika Hellas ABEE.**
- [20] **Ching A.**, “Behavior of FRP – confined concrete”, MSc Thesis, MIT, 2001.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α. ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Β. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Γ. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

A. ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

(i) Κεφαλαία λατινικά

A_f : το εμβαδόν της διατομή της ίνας των σύνθετων υλικών

E_f : το μέτρο ελαστικότητας των ινών

R : η ακτίνα του κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος

D : η διάμετρος του κυλινδρικού στοιχείου σκυροδέματος

A_g : εμβαδόν διατομής

E_1 : η κλίση της πρώτης ευθείας του δι-γραμμικού διαγράμματος $\sigma - \varepsilon$

E_2 : η κλίση της δεύτερης ευθείας του δι-γραμμικού διαγράμματος $\sigma - \varepsilon$

(ii) Πεζά λατινικά

f_{co} : η αντοχή σε θλίψη του απερίσφιγκτου σκυροδέματος

$f_{cc,u}$: η αντοχή σε θλίψη του περισφιγμένου σκυροδέματος

f_r : η τάση που ασκείται λόγω περίσφιγξης (στην εγκάρσια διεύθυνση)

k_1 : ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης

t_f : πάχος του υφάσματος

f_{cc} : η αντοχή σε θλίψη του περισφιγμένου με φύλλα FRP σκυροδέματος.

f_0 : η τάση που προκύπτει από την επέκταση της δεύτερης ευθείας της καμπύλης μέχρι τον άξονα των τάσεων

n : παράμετρος που περιγράφει την καμπύλωση της μεταβατικής περιοχής

f_f : η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών

(iii) Πεζά Ελληνικά

ε_{c0} : η παραμόρφωση αστοχίας του απερίσφιγκτου σκυροδέματος

$\varepsilon_{cc,u}$: η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος

ε_f : η παραμόρφωση αστοχίας των ινών FRP

B. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1.2: Ενδεικτικές διατάξεις καμπτικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων για μέγιστη ροπή στα άκρα. (α) Εσφαλμένη εφαρμογή (β) συνέχεια οπλισμού τύπου ελάσματος μέσω της πλάκας (γ) συνέχεια οπλισμού τύπου ράβδου σε εγκοπές μέσω του κόμβου [1].

Σχήμα 1.2.1: Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα [1].

Σχήμα 1.3.1: Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης σε εφελκυσμό για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με χάλυβα [5].

Σχήμα 1.3.2: Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με χαλύβδινα στοιχεία και με ινοπλισμένα πολυμερή [5].

Σχήμα 1.4.1: Σύγκριση της αποτελεσματικότητας περίσφιγξης για τρεις τύπους μανδύων [6].

Σχήμα 1.4.2: (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος περισφιγμένου από μανδύα σύνθετων υλικών και (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης [1].

Σχήμα 1.4.3: Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα απερίσφιγκτο και περισφιγμένο με σύνθετα υλικά μεταβλητού πάχους [1].

Σχήμα 2.3.1: Χαρακτηριστική απόκριση τάσης – παραμόρφωσης σε σκυρόδεμα περισφιγμένο με μανδύα σύνθετων υλικών υπό μονοαξονική θλίψη.

Σχήμα 2.3.2: Απόκριση τάσης – παραμόρφωσης σε περισφιγμένο σκυρόδεμα ως συνάρτηση της αυξανόμενης τάσης περίσφιγξης.

Σχήμα 2.4.1: Διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ και παράμετροι που χρησιμοποιεί το προσομοίωμα των Samaan et al για τις προβλέψεις των τιμών αντοχής του σκυροδέματος.

Σχήμα 2.6.1: Διαδικασία υπολογισμού τελικής θλιπτικής αντοχής και παραμόρφωσης περισφιγμένου με μανδύα FRPs σκυροδέματος.

Σχήμα 2.3.2: Σύγκριση των τιμών της εξίσωσης του μοντέλου των Spoelstra and Monti για την αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος, με πειραματικά δεδομένα.

Σχήμα 2.3.3: Σύγκριση των τιμών της εξίσωσης του μοντέλου των Spoelstra and Monti για την παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος, με πειραματικά δεδομένα.

Σχήμα 2.7.1: Αναλυτική παρουσίαση της καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων που πρότεινε ο H. Toutanji.

Σχήμα 2.9.1: Πειραματικά δεδομένα και εξίσωση παλινδρόμησης για τον συντελεστή περίσφιγξης k .

Σχήμα 2.10.1: Ένα τυπικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για ένα περισφιγμένο κύλινδρο σκυροδέματος

Σχήμα 2.10.2: Επαλληλία της εξωτερικής και εσωτερικής κατανομής τάσεων περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος

Σχήμα 2.10.3: Δράση περίσφιγξης μεταξύ κυλίνδρου σκυροδέματος και σύνθετων υλικών

Σχήμα 2.10.4: Κύκλος Mohr της τριαξονικής τάσης ενός περισφιγμένου κυλίνδρου σκυροδέματος

Σχήμα 2.10.5: Αποτελεσματικότητα περίσφιγξης συναρτήσει λόγου περίσφιγξης.

Σχήμα 2.11.1: Διάγραμμα σ-ε πειραμάτων Wu et al για κράτυνση και μείωση της αποκρίσεως μανδύα

Σχήμα 3.2.1: Σχηματικό διάγραμμα περιπτώσεων επαλληλίας στρώσεων υφάσματος C (άνθρακα) και G (γυαλιού)

Σχήμα 3.2.2: Τρόπος αστοχίας μανδύα σύνθετων υλικών με επαλληλία: (a) G/C/C (b) C/G/C και (c) C/C/G.

Σχήμα 3.2.3: Τρόπος αστοχίας μανδύα σύνθετων υλικών με επαλληλία: (a) C/G/G (b) G/C/G και (c) G/G/C.

Σχήμα 3.2.4: Μεταβολή θλιπτικής αντοχής κυλίνδρων πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 3.2.5: Μεταβολή θλιπτικής αντοχής κυλίνδρων πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 3.2.6: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 3.2.7: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 3.2.8: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 3.2.9: Μεταβολή λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen [7] συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 4.3.1: Σχηματική αναπαράσταση αντοχής κυλίνδρων α'ομάδας α'κοκκομετρικής διαβάθμισης [18]

Σχήμα 4.3.2: Σχηματική αναπαράσταση αντοχής κυλίνδρων β'ομάδας α'κοκκομετρικής διαβάθμισης [18]

Σχήμα 4.3.3: Σχηματική αναπαράσταση αντοχής κυλίνδρων β'κοκκομετρικής διαβάθμισης δοκιμίων [18]

Σχήμα 4.3.4: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος C, συναρτήσει του πάχους του μανδύα.

Σχήμα 4.3.5: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος G, συναρτήσει του πάχους του μανδύα.

Σχήμα 4.3.6: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 4.3.7: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα αντοχές κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 4.3.8: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος C, συναρτήσει του πάχους του μανδύα.

Σχήμα 4.3.9: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφάσματος G, συναρτήσει του πάχους του μανδύα.

Σχήμα 4.3.10: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος C προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Σχήμα 4.3.11: Προβλεπόμενες από τα προσομοιώματα παραμορφώσεις αστοχίας κυλίνδρων περισφιγμένων με μανδύα υφασμάτων G και C, συναρτήσει του λόγου του πάχους υφάσματος G προς το ολικό πάχος του μανδύα.

Εικόνα 1.1.1: Ενίσχυση σε διάτμηση (α)κρίσιμης περιοχής δοκού (β)υποστυλώματος [1].

Εικόνα 1.1.2: Ενίσχυση σε κάμψη δοκών μέσω εφαρμογής ελασμάτων [1].

Εικόνα 1.1.3: Περίσφιγξη υποστυλωμάτων με μανδύες σύνθετων υλικών [1].

Εικόνες 4.4.1: Κοντινά στιγμιότυπα της μηχανικής εκτράχυνσης της επιφάνειας των δοκιμίων.

Εικόνες 4.4.2: Παρασκευαστής με προστατευτικά γυαλιά και μάσκα κατά τη διαδικασία εκτράχυνσης της επιφάνειας των δοκιμίων.

Εικόνες 4.4.3: Διαδικασία παρασκευής κόλλας μέσω ανάμειξης των δύο συστατικών.

Εικόνες 4.4.4: Διαδικασία εφαρμογής κόλλας στην επιφάνεια των δοκιμίων

Εικόνες 4.4.5: Ταξινόμηση, σήμανση και φύλαξη των δοκιμίων.

Γ. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.2.1: Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ινών [1].

Πίνακας 1.2.2: Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα, αραμιδίου, γυαλιού [2].

Πίνακας 1.2.3: Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ρητινών χρησιμοποιούμενων ως μήτρα [3].

Πίνακας 1.2.4: Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ρητινών χρησιμοποιούμενων ως κόλλα [4].

Πίνακας 3.2.1: Ιδιότητες υλικών (σκυρόδεμα, υφάσματα γυαλιού και άνθρακα) που χρησιμοποιούνται στα πειράματα των Lin and Chen [7].

Πίνακας 3.2.2: Πειραματικές τιμές αντοχής κυλίνδρων σκυροδέματος περισφιγμένων με μανδύα σύνθετων υλικών από στρώσεις C (άνθρακα) και G (γυαλιού) [7]. Μονάδες: MPa

Πίνακας 3.2.3: Πειραματικές τιμές [7] αντοχής κυλίνδρων σκυροδέματος περισφιγμένων με μανδύα σύνθετων υλικών από στρώσεις C και G.

Πίνακας 3.2.4: Τιμές λόγου $f_{cc,u,mod} / f_{cc,u,exp}$ πειράματος Lin and Chen για καθένα εκ των 5 επλεγόμενων ως αξιόπιστων προσομοιωμάτων [7].

Πίνακας 4.3.1: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη κυλίνδρων α' ομάδας α' κοκκομετρικής διαβάθμισης δοκιμίων σε θλίψη [18].

Πίνακας 4.3.2: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη κυλίνδρων β' ομάδας α' κοκκομετρικής διαβάθμισης [18].

Πίνακας 4.3.3: Αποτελέσματα αντοχής κυλίνδρων σε θλίψη β'κοκκομετρικής διαβάθμισης [21].

Πίνακας 4.3.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών σκυροδέματος.

Πίνακας 4.3.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 230 C/45.

Πίνακας 4.3.6: Μηχανικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 230 C/45 (ονομαστικές τιμές).

Πίνακας 4.3.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 430 G/25.

Πίνακας 4.3.8: Μηχανικά χαρακτηριστικά υφάσματος Sika Wrap 430 G/25 (ονομαστικές τιμές).

Πίνακας 4.3.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά κόλλας Sikadur – 330.

Πίνακας 4.3.10: Μηχανικά χαρακτηριστικά κόλλας Sikadur – 330.

Πίνακας 4.5.1: Προβλεπόμενες τιμές αντοχής για κάθε διάταξη μανδύα, με βάση τα αναλυτικά προσομοιώματα.

Πίνακας 4.5.2: Προβλεπόμενες τιμές παραμόρφωσης αστοχίας για κάθε διάταξη μανδύα, με βάση τα αναλυτικά προσομοιώματα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΙΝΑΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Πίνακας Β.1: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Fardis and Khalili [10].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	k_1	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	68.20	1.90	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	67.30	1.93	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	68.00	1.91	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	62.10	2.09	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	80.10	1.62	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	65.80	1.97	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	82.70	1.57	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	86.80	1.49	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.63	129.60	78.90	1.64	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	91.20	1.61	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	95.90	1.53	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	93.80	1.57	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	94.00	1.57	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	95.90	1.53	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	95.10	1.55	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	100.50	1.46	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	100.40	1.47	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.54	147.13	94.80	1.55	0.78	0.22

Πίνακας Β.2: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Karbhari and Gao I [8].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	όρος με 3.1	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	68.20	0.83	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	67.30	0.84	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	68.00	0.83	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	62.10	0.91	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	80.10	0.70	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	65.80	0.86	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	82.70	0.68	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	86.80	0.65	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.47	56.36	78.90	0.71	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	91.20	0.67	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	95.90	0.64	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	93.80	0.65	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	94.00	0.65	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	95.90	0.64	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	95.10	0.65	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	100.50	0.61	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	100.40	0.61	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	1.82	61.40	94.80	0.65	0.78	0.22

Πίνακας Β.3: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Karbhari and Gao II [8].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	68.20	1.24	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	67.30	1.26	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	68.00	1.24	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	62.10	1.36	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	80.10	1.05	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	65.80	1.28	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	82.70	1.02	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	86.80	0.97	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	84.49	78.90	1.07	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	91.20	1.04	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	95.90	0.99	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	93.80	1.01	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	94.00	1.01	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	95.90	0.99	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	95.10	0.99	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	100.50	0.94	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	100.40	0.94	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.58	94.80	1.00	0.78	0.22

Πίνακας Β.4: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Samaan et al [12].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	k_1	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	68.20	1.29	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	67.30	1.31	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	68.00	1.30	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	62.10	1.42	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	80.10	1.10	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	65.80	1.34	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	82.70	1.07	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	86.80	1.02	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.19	88.14	78.90	1.12	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	91.20	1.06	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	95.90	1.01	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	93.80	1.03	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	94.00	1.03	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	95.90	1.01	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	95.10	1.02	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	100.50	0.96	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	100.40	0.96	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.07	96.62	94.80	1.02	0.78	0.22

Πίνακας Β.5: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Miyauchi et al [11].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	$f_{cc,u. mod}$ (MPa)	$f_{cc,u. exp}$ (MPa)	$f_{cc,u mod}/f_{cc,u exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	68.20	1.84	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	67.30	1.86	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	68.00	1.84	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	62.10	2.02	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	80.10	1.57	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	65.80	1.91	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	82.70	1.52	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	86.80	1.45	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	125.43	78.90	1.59	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	91.20	1.59	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	95.90	1.51	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	93.80	1.55	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	94.00	1.55	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	95.90	1.51	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	95.10	1.53	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	100.50	1.45	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	100.40	1.45	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	145.26	94.80	1.53	0.78	0.22

Πίνακας Β.6: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Spoelstra and Monti [9].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	68.20	1.26	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	67.30	1.27	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	68.00	1.26	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	62.10	1.38	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	80.10	1.07	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	65.80	1.30	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	82.70	1.04	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	86.80	0.99	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.54	743.9	770	28.79	85.67	78.90	1.09	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	91.20	1.02	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	95.90	0.97	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	93.80	0.99	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	94.00	0.99	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	95.90	0.97	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	95.10	0.98	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	100.50	0.93	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	100.40	0.93	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.54	743.9	770	34.48	93.28	94.80	0.98	0.78	0.22

Πίνακας Β.7: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Toutanji [13].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	k_1	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	68.20	1.82	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	67.30	1.84	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	68.00	1.82	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	62.10	1.99	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	80.10	1.55	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	65.80	1.88	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	82.70	1.50	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	86.80	1.43	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.43	123.81	78.90	1.57	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	91.20	1.54	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	95.90	1.46	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	93.80	1.49	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	94.00	1.49	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	95.90	1.46	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	95.10	1.47	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	100.50	1.39	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	100.40	1.40	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	3.34	140.17	94.80	1.48	0.78	0.22

Πίνακας Β.8: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Saafi et al [14].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	E_{fG} (GPa)	E_{fC} (GPa)	f_{fG} (MPa)	f_{fC} (MPa)	f_r (MPa)	k_1	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	68.20	1.28	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	67.30	1.29	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	68.00	1.28	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	62.10	1.40	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	80.10	1.09	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	65.80	1.32	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	82.70	1.05	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	86.80	1.00	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	2.15	87.06	78.90	1.10	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	91.20	1.07	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	95.90	1.01	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	93.80	1.04	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	94.00	1.03	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	95.90	1.01	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	95.10	1.02	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	100.50	0.97	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	100.40	0.97	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.09	97.20	94.80	1.03	0.78	0.22

Πίνακας Β.9: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Xiao and Wu [15].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{t,G}$ (GPa)	$E_{t,C}$ (GPa)	$f_{t,G}$ (MPa)	$f_{t,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	C_f (GPa)	k	$f_{cc,u, mod}$ (MPa)	$f_{cc,u, exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	68.20	2.08	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	67.30	2.11	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	68.00	2.09	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	62.10	2.29	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	80.10	1.77	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	65.80	2.16	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	82.70	1.72	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	86.80	1.64	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	3.74	3.97	142.02	78.90	1.80	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	91.20	1.79	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	95.90	1.70	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	93.80	1.74	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	94.00	1.73	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	95.90	1.70	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	95.10	1.71	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	100.50	1.62	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	100.40	1.62	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	2.76	3.93	163.08	94.80	1.72	0.78	0.22

Πίνακας Β.10: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων Lin and Chen [7] με προβλέψεις προσομοιώματος Lin and Chen [7].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$f_{cc,u,exp}$ (MPa)	$f_{cc,u,mod}/f_{cc,u,exp}$	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	68.20	1.21	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	67.30	1.23	0.47	0.53
C/C/G	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	68.00	1.22	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	62.10	1.33	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	80.10	1.03	0.47	0.53
C/G/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	65.80	1.26	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	82.70	1.00	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	86.80	0.95	0.47	0.53
G/C/C	100	200	25.1	23.54	1	2	0.9	1	32.9	157.5	743.9	770	28.79	82.68	78.90	1.05	0.47	0.53
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	91.20	1.03	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	95.90	0.98	0.78	0.22
C/G/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	93.80	1.00	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	94.00	1.00	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	95.90	0.98	0.78	0.22
G/C/G	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	95.10	0.99	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	100.50	0.94	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	100.40	0.94	0.78	0.22
G/G/C	100	200	25.1	23.54	2	1	1.8	0.5	32.9	157.5	743.9	770	34.48	94.06	94.80	0.99	0.78	0.22

Πίνακας Β.11: Αναμενόμενη αντοχή και παραμόρφωση αστοχίας δοκιμών πειραματικού προγράμματος με χρήση προσομοιώματος Karbhari and Gao II [8].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	E_{tG} (GPa)	E_{tC} (GPa)	f_{tG} (MPa)	f_{tC} (MPa)	f_r (MPa)	$f_{cc,u.}$ $_{mod}$ (MPa)	ε_{co} %	$\varepsilon_{cc,mod}$ %	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
G	150	300	20	28.85	1	0	0.172	0	76	234	2300	4300	5.27	33.17	0.2	0.464	1.00	0.00
C	150	300	20	28.85	0	1	0	0.131	76	234	2300	4300	7.51	37.91	0.2	0.576	0.00	1.00
G/G	150	300	20	28.85	2	0	0.344	0	76	234	2300	4300	10.55	44.07	0.2	0.727	1.00	0.00
C/C	150	300	20	28.85	0	2	0	0.262	76	234	2300	4300	15.02	52.74	0.2	0.951	0.00	1.00
G/G/G	150	300	20	28.85	3	0	0.516	0	76	234	2300	4300	15.82	54.26	0.2	0.991	1.00	0.00
C/C/C	150	300	20	28.85	0	3	0	0.393	76	234	2300	4300	22.53	66.59	0.2	1.327	0.00	1.00
G/C - C/G	150	300	20	28.85	1	1	0.172	0.131	76	234	2300	4300	12.79	48.46	0.2	0.839	0.57	0.43
G/C/C-C/G/C-C/C/G	150	300	20	28.85	1	2	0.172	0.262	76	234	2300	4300	20.30	62.54	0.2	1.215	0.40	0.60
C/G/G-G/C/G-G/G/C	150	300	20	28.85	2	1	0.344	0.131	76	234	2300	4300	18.06	58.43	0.2	1.103	0.72	0.28
G/C/G/C/G	150	300	20	28.85	3	2	0.516	0.262	76	234	2300	4300	30.85	81.23	0.2	1.742	0.66	0.34
C/G/C/G/C	150	300	20	28.85	2	3	0.344	0.393	76	234	2300	4300	33.08	85.07	0.2	1.854	0.47	0.53

Πίνακας Β.12: Αναμενόμενη αντοχή και παραμόρφωση αστοχίας δοκιμίων πειραματικού προγράμματος με χρήση προσομοιώματος Samaan et al [12].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	k_1	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	f_0 (MPa)	E_2 (MPa)	$\varepsilon_{cc,mod}$ %	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
G	150	300	20	28.85	1	0	0.172	0	76	234	2300	4300	5.27	3.64	39.22	25.65	564.41	2.40	1.00	0.00
C	150	300	20	28.85	0	1	0	0.131	76	234	2300	4300	7.51	3.28	44.61	26.48	722.14	2.51	0.00	1.00
G/G	150	300	20	28.85	2	0	0.344	0	76	234	2300	4300	10.55	2.96	51.22	27.61	681.68	3.46	1.00	0.00
C/C	150	300	20	28.85	0	2	0	0.262	76	234	2300	4300	15.02	2.66	59.98	29.27	997.12	3.08	0.00	1.00
G/G/G	150	300	20	28.85	3	0	0.516	0	76	234	2300	4300	15.82	2.62	61.46	29.57	798.94	3.99	1.00	0.00
C/C/C	150	300	20	28.85	0	3	0	0.393	76	234	2300	4300	22.53	2.36	73.10	32.06	1272.11	3.23	0.00	1.00
G/C - C/G	150	300	20	28.85	1	1	0.172	0.131	76	234	2300	4300	12.79	2.79	55.71	28.44	839.40	3.25	0.57	0.43
G/C/C-C/G/C-C/C/G	150	300	20	28.85	1	2	0.172	0.262	76	234	2300	4300	20.30	2.43	69.36	31.23	1114.39	3.42	0.40	0.60
C/G/G-G/C/G-G/G/C	150	300	20	28.85	2	1	0.344	0.131	76	234	2300	4300	18.06	2.52	65.48	30.40	956.66	3.67	0.72	0.28
G/C/G/C/G	150	300	20	28.85	3	2	0.516	0.262	76	234	2300	4300	30.85	2.14	86.16	35.14	1348.92	3.78	0.66	0.34
C/G/C/G/C	150	300	20	28.85	2	3	0.344	0.393	76	234	2300	4300	33.08	2.10	89.48	35.97	1506.64	3.55	0.47	0.53

Πίνακας Β.13: Αναμενόμενη αντοχή και παραμόρφωση αστοχίας δοκιμών πειραματικού προγράμματος με χρήση προσομοιώματος Spoelstra and Monti [9].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f _{co} (MPa)	E _c (GPa)	n _G	n _C	t _G (mm)	t _C (mm)	E _{f,G} (GPa)	E _{f,C} (GPa)	f _{f,G} (MPa)	f _{f,C} (MPa)	ε _{f,G} %	ε _{f,C} %	f _r (MPa)	f _{cc,u.} mod (MPa)	ε _{co} %	ε _{cc,mod} %	t _G / t _{ολ}	t _C / t _{ολ}
G	150	300	20	28.85	1	0	0.172	0	76	234	2300	4300	3.026	1.838	5.27	34.81	0.2	6.0	1.00	0.00
C	150	300	20	28.85	0	1	0	0.13	76	234	2300	4300	3.026	1.838	7.51	40.77	0.2	7.1	0.00	1.00
G/G	150	300	20	28.85	2	0	0.344	0	76	234	2300	4300	3.026	1.838	10.55	47.58	0.2	8.3	1.00	0.00
C/C	150	300	20	28.85	0	2	0	0.26	76	234	2300	4300	3.026	1.838	15.02	56.00	0.2	9.9	0.00	1.00
G/G/G	150	300	20	28.85	3	0	0.516	0	76	234	2300	4300	3.026	1.838	15.82	57.37	0.2	10.1	1.00	0.00
C/C/C	150	300	20	28.85	0	3	0	0.39	76	234	2300	4300	3.026	1.838	22.53	67.68	0.2	12.0	0.00	1.00
G/C - C/G	150	300	20	28.85	1	1	0.172	0.13	76	234	2300	4300	3.026	1.838	12.79	51.97	0.2	9.1	0.57	0.43
G/C/C-C/G/C-C/C/G	150	300	20	28.85	1	2	0.172	0.26	76	234	2300	4300	3.026	1.838	20.30	64.44	0.2	11.4	0.40	0.60
C/G/G-G/C/G-G/G/C	150	300	20	28.85	2	1	0.344	0.13	76	234	2300	4300	3.026	1.838	18.06	61.02	0.2	10.8	0.72	0.28
G/C/G/C/G	150	300	20	28.85	3	2	0.516	0.26	76	234	2300	4300	3.026	1.838	30.85	78.51	0.2	14.0	0.66	0.34
C/G/C/G/C	150	300	20	28.85	2	3	0.344	0.39	76	234	2300	4300	3.026	1.838	33.08	81.17	0.2	14.4	0.47	0.53

Πίνακας Β.14: Αναμενόμενη αντοχή και παραμόρφωση αστοχίας δοκιμών πειραματικού προγράμματος με χρήση προσομοιώματος Saafi et al [14].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	$\varepsilon_{f,G}$ %	$\varepsilon_{f,C}$ %	f_r (MPa)	k_I	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	ε_{co} %	$\varepsilon_{cc,mod}$ %	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
G	150	300	20	28.85	1	0	0.172	0	76	234	2300	4300	3.026	1.84	5.27	2.72	34.36	0.2	2.9	1.00	0.00
C	150	300	20	28.85	0	1	0	0.13	76	234	2300	4300	3.026	1.84	7.51	2.57	39.33	0.2	3.8	0.00	1.00
G/G	150	300	20	28.85	2	0	0.344	0	76	234	2300	4300	3.026	1.84	10.55	2.44	45.71	0.2	5.0	1.00	0.00
C/C	150	300	20	28.85	0	2	0	0.26	76	234	2300	4300	3.026	1.84	15.02	2.30	54.60	0.2	6.7	0.00	1.00
G/G/G	150	300	20	28.85	3	0	0.516	0	76	234	2300	4300	3.026	1.84	15.82	2.28	56.14	0.2	7.0	1.00	0.00
C/C/C	150	300	20	28.85	0	3	0	0.39	76	234	2300	4300	3.026	1.84	22.53	2.16	68.63	0.2	9.4	0.00	1.00
G/C - C/G	150	300	20	28.85	1	1	0.172	0.13	76	234	2300	4300	3.026	1.84	12.79	2.36	50.22	0.2	5.9	0.57	0.43
G/C/C-C/G/C-C/C/G	150	300	20	28.85	1	2	0.172	0.26	76	234	2300	4300	3.026	1.84	20.30	2.19	64.55	0.2	8.6	0.40	0.60
C/G/G-G/C/G-G/G/C	150	300	20	28.85	2	1	0.344	0.13	76	234	2300	4300	3.026	1.84	18.06	2.24	60.39	0.2	7.8	0.72	0.28
G/C/G/C/G	150	300	20	28.85	3	2	0.516	0.26	76	234	2300	4300	3.026	1.84	30.85	2.05	83.32	0.2	12.1	0.66	0.34
C/G/C/G/C	150	300	20	28.85	2	3	0.344	0.39	76	234	2300	4300	3.026	1.84	33.08	2.03	87.15	0.2	12.9	0.47	0.53

Πίνακας Β.15: Αναμενόμενη αντοχή και παραμόρφωση αστοχίας δοκιμών πειραματικού προγράμματος με χρήση προσομοιώματος Lin and Chen [7].

Δοκίμιο	D (mm)	H (mm)	f_{co} (MPa)	E_c (GPa)	n_G	n_C	t_G (mm)	t_C (mm)	$E_{f,G}$ (GPa)	$E_{f,C}$ (GPa)	$f_{f,G}$ (MPa)	$f_{f,C}$ (MPa)	f_r (MPa)	$f_{cc,u,mod}$ (MPa)	$t_G / t_{ολ}$	$t_C / t_{ολ}$
G	150	300	20	28.85	1	0	0.172	0	76	234	2300	4300	5.27	30.55	1.00	0.00
C	150	300	20	28.85	0	1	0	0.131	76	234	2300	4300	7.51	35.02	0.00	1.00
G/G	150	300	20	28.85	2	0	0.344	0	76	234	2300	4300	10.55	41.10	1.00	0.00
C/C	150	300	20	28.85	0	2	0	0.262	76	234	2300	4300	15.02	50.04	0.00	1.00
G/G/G	150	300	20	28.85	3	0	0.516	0	76	234	2300	4300	15.82	51.65	1.00	0.00
C/C/C	150	300	20	28.85	0	3	0	0.393	76	234	2300	4300	22.53	65.06	0.00	1.00
G/C - C/G	150	300	20	28.85	1	1	0.172	0.131	76	234	2300	4300	12.79	45.57	0.57	0.43
G/C/C-C/G/C-C/C/G	150	300	20	28.85	1	2	0.172	0.262	76	234	2300	4300	20.30	60.59	0.40	0.60
C/G/G-G/C/G-G/G/C	150	300	20	28.85	2	1	0.344	0.131	76	234	2300	4300	18.06	56.12	0.72	0.28
G/C/G/C/G	150	300	20	28.85	3	2	0.516	0.262	76	234	2300	4300	30.85	81.69	0.66	0.34
C/G/C/G/C	150	300	20	28.85	2	3	0.344	0.393	76	234	2300	4300	33.08	86.16	0.47	0.53